



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Estudios de tratabilidad del agua en una planta piloto construida en el parque El Paraíso, e implementación de modelo numérico de la estructura.

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de
Ingeniero Civil.

Autor:

Alex Marcelo, Mogrovejo Nieves

CI: 0106773757

Correo electrónico: alexm-2021inproc@hotmail.com

Director:

Gladys Guillermina, Pauta Calle.

CI: 0300691045

Cuenca, Ecuador

08 de septiembre del 2021

Resumen:

Analizar el comportamiento del agua de acuerdo a su respectivo tratamiento es fundamental en el sentido económico, social, cultural. El diseño se realiza en base a estudios de calidad de agua para el respectivo tratamiento y purificación al ingreso de los hogares, hospitales, zonas recreacionales las cuales deberán ser en un análisis mínimo pero deberán cumplir ciertas normas de calidad de agua. El agua es uno de los recursos naturales más importantes para la vida, conservación del medio ambiente y más parámetros asociados a la calidad de vida, en las ciudades de todo el mundo es importante analizar este tema de acuerdo a su importancia para tener un ambiente saludable y condiciones de salubridad y salud indispensables para el día a día, así como en los ámbitos estéticos del agua tal es el caso del agua en los ámbitos recreacionales en donde se verificar el color, el olor, la turbiedad, índice de bacterias, coliformes, patógenos entre otros. Uno de los mayores inconvenientes en los sistemas de tratamiento de agua potable para las comunidades, es la falta de ensayos de caracterización del agua cruda, que permitan un conocimiento básico de su composición y de su respuesta frente al proceso de potabilización y estabilización ambiental, se utilizara un floculador para el respectivo análisis de tiempo de retención, niveles de sedimentación, dosis de cloro, nivel de sedimentos.

La implementación de Modelos Numéricos en el campo de ingeniería civil con la facilidad tecnológica, se ha vuelto indispensable e indiscutible debido a la facilidad de ensayos a realizarse previa manipulación de los diferentes parámetros involucrados en la estructura, haber un potente software libre para la modelización bidimensional de flujo agua con aplicación a la hidráulica y morfología fluvial.

Palabras claves: Calidad de agua. Coliformes. Floculador. Modelo numérico. Iber

Abstract:

Analyzing the behavior of water according to its respective treatment is fundamental in the economic, social, cultural sense. The design is based on water quality studies for the respective treatment and purification at the entrance of homes, hospitals, recreational areas which should be in a minimum analysis but must meet certain water quality standards. Water is one of the most important natural resources for life, conservation of the environment and more parameters associated with the quality of life, in cities around the world it is important to analyze this issue according to its importance to have a healthy environment and conditions of healthiness and health essential for day to day, as well as in the aesthetic areas of water such is the case of water in recreational areas where color, smell, turbidity, bacteria index, coliforms, pathogens among others. One of the biggest problems in drinking water treatment systems for communities is the lack of raw water characterization tests, which allow a thorough knowledge of their composition and their response to the process of purification and environmental stabilization. Use a flocculator for the respective analysis of retention time, sedimentation levels, chlorine dose, sediment level.

The implementation of Numerical Models in the field of civil engineering with the technological facility, has become indispensable and indisputable due to the ease of tests to be performed prior to manipulation of the different parameters involved in the structure, Iber a powerful free software for two-dimensional modeling of water flow with application to hydraulics and fluvial morphology.

Keywords: Water quality. Coliforms. Flocculator. Numerical model. Iber.



Índice del Trabajo

Resumen:	1
Abstract:	2
Índice de Tablas, gráficos, figuras, ecuaciones.	7
Dedicatoria	9
Agradecimientos	10
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo General:	14
1.3.2 Objetivos Específicos:	14
CAPITULO 2. MARCO TEORICO	15
2.1 Generalidades de la Modelación.	15
2.1.1 Modelación física.	15
2.1.2 Modelación Numérica.	16
2.1.3 Fundamentos hidráulicos del modelo.	17
2.2. Características de las agua de los ríos.	19
2.2.1 Características Organolépticas	19
2.2.2 Parámetros Físicos	20
2.2.3 Parámetros Químicos	21
2.2.4 Parámetros Bacteriológicos	22
2.3 Fundamentos del sistema convencional de tratamiento simulado.	22
2.3.1 Coagulación.	23
2.3.2 Floculación.	24
2.3.3 Sedimentación.	24
2.3.4 Filtración.	25
2.3.5 Desinfección.	25
2.3.6 Estudios de caracterización y tratabilidad.	25
CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1 Ubicación y área estudio	26
3.2 Descripción de la estructura construida y ensayos realizados.	26
3.3 Correlación entre modelo físico y el modelo a escala de laboratorio.	28
3.3.1 Ensayos de laboratorio.	28
3.3.2 Ensayos en la planta piloto.	29



3.3.3 Medición de flujo en el vertedero	30
3.4 Unidad de mezcla rápida para la coagulación.	30
3.5 Unidad de mezcla lenta para la floculación.	34
3.6 Validación de modelo físico.	36
3.7 Modelación numérica de la estructura (Iber).	36
CAPITULO 4. RESULTADOS	40
4.1 Resultados de ensayos de la Caracterización y Tratabilidad del agua.	40
4.2 Resultados de ensayos para determinación del caudal, por el Método Volumétrico.	42
4.3 Ensayos de trazadores.	43
CAPITULO V. DISCUSION	51
5.1. Sobre la tratabilidad del agua	51
5.2 Sobre la validación del modelo físico	52
5.3 Sobre la modelación numérica (Iber)	52
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
6.1. Conclusiones	54
6.2. Recomendaciones	56
6.3. Futuras líneas de investigación	57
7. BIBLIOGRAFIA.....	58

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Alex Marcelo Mogrovejo Nieves, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudios de tratabilidad del agua en una planta piloto construida en el parque El Paraíso, e implementación de modelo numérico de la estructura”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 8 de Septiembre del 2021



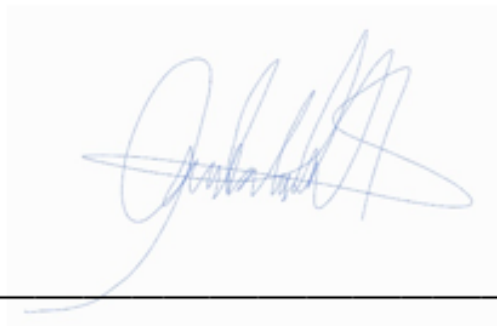
Alex Marcelo Mogrovejo Nieves

C.I: 0106773757

Cláusula de Propiedad Intelectual

Alex Marcelo Mogrovejo Nieves, autor del trabajo de titulación “Estudios de tratabilidad del agua en una planta piloto construida en el parque El Paraíso, e implementación de modelo numérico de la estructura”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 8 de Septiembre del 2021



Alex Marcelo Mogrovejo Nieves

C.I: 0106773757

Índice de Tablas, gráficos, figuras, ecuaciones.

Ecuación 1 Conservación de la masa y Momento.

Ecuación 2 Conservación de la masa y Momento en dirección eje X.

Ecuación 3 Conservación de la masa y Momento en dirección eje Y.

Ecuación 4 Fricción debido al rozamiento de fondo en dirección eje X.

Ecuación 5 Fricción debido al rozamiento de fondo en dirección eje Y.

Ecuación 6 Velocidad del viento.

Ecuación 7 Función de Velocidad del viento.

Ecuación 8. Ecuación de vertedero cresta delgada

Ecuación 9. Ecuación de vertedero cresta delgada altura desarrollada.

Ecuación 10. Ecuación de vertedero cresta delgada (altura).

Ecuación 11 Volumen de la estructura.

Ecuación 12 Gradiente de velocidad.

Figura 1. Ubicación de modelo físico en parque el Paraíso Fuente (Propia)

Figura 2. Planta Piloto. Fuente

Figura 3. Equipo ISA, ensayo de jarras.

Figura 4. Perfil de unidad de mezcla rápida, Fuente (Propia).

Figura 5. Planta de unidad de mezcla rápida, escala 1:20, Fuente (Propia).

Figura 6. Planta de unidad de mezcla lenta, escala 1:20, Fuente (Propia).

Figura 7. Corte A-A de unidad de mezcla lenta, escala 1:20, Fuente (Propia)

Figura 8. Corte B-B de unidad de mezcla lenta, escala 1:20, Fuente (Propia).

Figura 9. Análisis de velocidad, paso 20 de 800 s, Fuente Propia

Figura 10. Análisis de velocidad, paso 380 de 800 s, Fuente Propia

Figura 11. Análisis de velocidad, paso 800 de 800 s, Fuente Propia

Figura 12. Análisis de número de Froude, paso 20 de 800 s, Fuente Propia

Figura 13. Análisis de número de Froude, paso 380 de 800 s, Fuente Propia

Figura 14. Análisis de número de Froude, paso 800 de 800 s, Fuente Propia

Figura 15. Análisis de cota de agua en el modelo, paso 800 de 800 s, Fuente Propia

Figura 16. Análisis de vectores de velocidad, paso 800 de 800 s, Fuente Propia

Tabla 1. Resultados de temperatura y función de temperatura, de acuerdo a la tabla 2

Tabla 2. Valores de función de temperatura.

Tabla 3. Relación de vanos con pérdida de carga. Fuente (Propia).

Tabla 4. Parámetros de tiempos de simulación.

Tabla 5. Tabla resumen de ensayos en modelo físico, coagulante y polímero a utilizar para el tratamiento de agua, se anexa hojas de reporte, Anexo 1.

Tabla 6. Dosis óptima de coagulante y polímero en las muestras analizadas.

Tabla 7. Características del agua tratada en la planta piloto.

Tabla 8. Datos de aforos sobre vertedero de entrada. Fuente Propia.

Tabla 9, constantes para cálculo de caudal teórico.

Tabla 10. Prueba de trazadores. Fuente Propia.

Tabla 11. Resultados de análisis de gradiente de velocidad en unidad de mezcla rápida y lenta respectivamente. Fuente (Propia).

Gráfico 1. Modelo de regresión polinómica, interpolación de temperatura a los 15.83 °C, Fuente (Propia).

Grafico 2. Ajuste de caudales teórico y real para obtener formula de caudal de calibración.

Grafico 3. Calculo del periodo de retención en la estructura mediante el ensayo de trazadores.



Dedicatoria

A mis padres, José y Yolanda, por el apoyo incondicional, a mis hermanos, Viviana, José Luis, Kevin, siendo pilar fundamental para ejemplo en el desarrollo de la vida profesional.



Agradecimientos

A la Doctora Guillermina Pauta, Directora de este Trabajo de Titulación, por el apoyo y orientación que he recibido durante el desarrollo de esta Tesis.

A mi tutor, Ingeniero Carlos Buñay Moncayo que con sus conocimientos y su paciencia de enseñanza este trabajo de titulación se hizo posible.

A mis tutoras, Bioquímicas Farmacéuticas: Andrea Abril y Gabriela Vásquez, que de manera desinteresada contribuyeron con el avance y desarrollo de esta tesis.

A la Ingeniera MS.c Verónica Carrillo S. que con su paciencia y esmero supo orientarme al desarrollo de este trabajo de titulación.

Al Ingeniero MS.c Esteban Alonso Pacheco T. que de manera incondicional permitió el análisis de bibliografía y trabajos similares para el desarrollo del presente escrito.



“¿Qué sabe el pez del agua donde nada toda su vida?”

Albert Einstein.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La Facultad de Ingeniería a través de los Laboratorios de Hidráulica & Dinámica de Fluidos y el de Sanitaria, mediante convenio Interinstitucional entre la Universidad de Cuenca y la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca EMAC EP, ejecutó en el período 2016 y 2017, un Proyecto de Vinculación con la Sociedad, titulado *“Mejoramiento de la Calidad del agua de la Laguna del Parque Recreacional del Paraíso”*; el objetivo de este proyecto fue proponer a la empresa EMAC EP alternativas para mejorar la calidad del agua de la laguna, a fin de que el recurso cumpla con los requisitos de calidad establecidas en la Normativa TULSMA (Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria Medio Ambiente) y estipuladas mediante registro oficial 270 de marzo del 2015, la última reglamentación vigente hasta la fecha de ejecución del proyecto. El uso del agua a preservar fue: “recreativo por contacto secundario”. (TULSMA, Noviembre 2015).

La laguna se abastece del agua del río Yanuncay después de la junta con el río Tarqui pero antes de la junta con el río Tomebamba; en este punto de captación el agua presenta niveles de contaminación por bacterias coliformes, muy por encima de lo fijado en la correspondiente normativa (1000 NMP/100ML), siendo éste el principal problema del centro recreativo, pues el agua puede vehiculizar microorganismos patógenos poniendo en riesgo la salud de la población, sobre todo de los visitantes más vulnerables.

La propuesta definitiva consideró la implementación de un sistema de desinfección continuo con cloro gaseoso, que permitiría alcanzar un nivel de bacterias acorde al uso del agua. No obstante para garantizar la eficiencia de la medida se construyó un modelo a escala reducida, en el cual se realizaron ensayos experimentales para obtener parámetros óptimos de desinfección como: dosis de desinfectante, tiempo de contacto, medición de cloro residual libre, gradiente de velocidad, y otros necesarios para el diseño de la propuesta definitiva. La planta piloto se construyó en la orilla del río Tomebamba considerando la posibilidad de cambiar la fuente de abastecimiento de la laguna, ya que ensayos realizados en este río mostraron una calidad microbiológica más satisfactoria que la fuente actual.

1.2 Justificación

Puesto que una de las alternativas que se propone para mejorar la calidad microbiológica de la laguna, es el uso del agua del río Tomebamba como fuente de abastecimiento, es necesario proceder con ensayos de caracterización y tratabilidad, para conocer el comportamiento de la nueva fuente frente al sistema convencional de tratamiento, esto es: respuesta a los coagulantes y ayudantes de floculación, para así disponer de datos de dosificación que permitan la mayor remoción de color, turbiedad y bacterias coliformes que son los parámetros que superan los valores establecidos por la normativa de referencia.

Con este antecedente resultó interesante desde el punto de vista didáctico e investigativo desarrollar en la planta piloto existente, ensayos de caracterización y tratabilidad del agua e implementar un modelo numérico que permita correlacionar los procesos de potabilización que se simularán, con las variables obtenidas en el modelo desarrollado.

Uno de los mayores inconvenientes en los sistemas de tratamiento de agua potable implementados sobre todo en comunidades pequeñas, es la falta de ensayos de caracterización y tratabilidad previos del agua cruda, que permitan la identificación del problema que se quiere resolver y de la respuesta del agua frente al proceso de potabilización propuesto. De ahí la necesidad de operar mediante modelos pilotos antes de proceder con alternativas definitivas.

Cada agua tiene propiedades físicas, químicas y microbiológicas muy específicas, las cuales deben ser conocidas y cuantificadas, más aún cuando las fuentes de abastecimiento son superficiales cuyas características son totalmente dependientes de la estación climatológica, en nuestro medio períodos de lluvia y estiaje; así el sistema de tratamiento definitivo debe garantizar la calidad de agua distribuida en todo momento.

Los estudios de tratabilidad pueden realizarse a escala de laboratorio y/o en plantas piloto a escala; los ensayos más aplicados se hacen a nivel del laboratorio, pero los más exitosos son los realizados a escala reducida, no obstante por temas de orden económico y disponibilidad de tiempo esto no siempre es posible, por lo que los prototipos construidos no siempre satisfacen los reales requerimientos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

Realizar ensayos de tratabilidad del agua del río Tomebamba, empleando una planta piloto construida en la orilla del río del mismo nombre.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Verificar la modelación física de la planta piloto
- Realizar la modelación numérica de la planta piloto
- Obtención de dosis óptima de coagulante y ayudante de floculación para el tratamiento convencional del agua del río Tomebamba en condiciones hidráulicas ya establecidas en la planta piloto.

CAPITULO 2. MARCO TEORICO

2.1 Generalidades de la Modelación.

Con frecuencia el ingeniero debe dar soluciones factibles en base a ciertos requerimientos a problemas ingenieriles; debe decidir a priori el enfoque, técnicas o métodos más convenientes para cada caso en particular. Algunas veces estas soluciones pueden ser sencillas, debido a que están bien definidas tanto la parte técnica como la económica, por lo que sólo basta aplicarlas. En otros casos, los problemas son complejos o desconocidos como por ejemplo el comportamiento hidráulico del flujo de agua al pasar por estructuras como canales, represas, cámaras de coagulación, floculación, sedimentación, etc.; en estos casos, se evaluará que tipo de investigación se va a adoptar. Dicha investigación se iniciará conceptualizando y esquematizando el problema, después se seleccionará la técnica física o matemática para estudiar el problema; a este proceso de abstracción se le conoce como modelación.

En definitiva la modelación implica simular un fenómeno real, conceptualizándolo y simplificándolo en mayor o menor medida, para luego describirlo y cuantificarlo.

2.1.1 Modelación física.

Es la simulación física de un fenómeno hidráulico que ocurre en relación con una obra de ingeniería, en un sistema semejante simplificado que permite observarlo y controlarlo con facilidad, además confirmar la validez del diseño de la obra, optimizarla o tomar nota de los efectos colaterales que deberán ser considerados durante la operación de la misma. El modelo físico o reducido, se caracteriza por la utilización de una réplica a escala del proceso del prototipo.

La Modelación Física es un método que permite determinar diferentes características tanto físicas como mecánicas de un elemento o situación mediante el comportamiento del modelo haciendo referencia al prototipo real; por lo tanto esta herramienta posee ventajas en cuanto a datos se refiere, ya que permite simular ciertas condiciones que en la realidad podrían generar altos costos o que debido a su dificultad no se habrían podido estudiar.

“La modelación de sistemas hidráulicos, como herramienta de revisión, diseño y en la toma de decisiones es en la actualidad una técnica indispensable dentro de las practicas modernas de la ingeniería civil y otras ingenierías.” (Garcia-Salas, J 2009)

Una de las ventajas de mayor influencia es que las variables a modelar pueden ser modificadas según los estudios que se requieran; todos los detalles en el modelo se pueden cambiar de la forma más conveniente y obtener una gran cantidad de datos que pueden significar una gran contribución en el entendimiento o la compresión del comportamiento a escala real del modelo, siendo este un gran aporte para la mitigación de riesgos o daños en la construcción de obras civiles. (Pérez, M 2018).

2.1.2 Modelación Numérica.

Un método numérico es un procedimiento mediante el cual se obtiene casi siempre de manera aproximada, la solución de ciertos problemas realizando cálculos puramente aritméticos y lógicos (operaciones aritméticas elementales, cálculo de funciones, consulta de una tabla de valores, cálculo proposicional, etc.).(R Seminario, 2018)

“Al momento de aplicar las Matemáticas a situaciones del mundo real nos encontramos a menudo con problemas que no pueden ser resueltos analíticamente o de manera exacta y cuya solución debe ser abordada con ayuda de algún procedimiento numérico”. (Seminario 2012)

“Modelo computacional IBER”, es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en régimen no permanente; la aplicación abarca la hidrodinámica fluvial la cual consta de tres módulos de análisis: un hidrodinámico, uno de turbulencia, y otro de transporte de sedimentos; todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros”.(Flumen 2010)

“Un método numérico es un procedimiento mediante el cual se obtiene, casi siempre de manera aproximada, la solución de ciertos problemas realizando cálculos puramente aritméticos y lógicos (operaciones aritméticas elementales, cálculo de funciones, consulta de una tabla de valores, cálculo proposicional, etc.).”(Seminario 2012)

“Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre bidimensional en régimen no permanente y de procesos medioambientales aplicables a la hidráulica fluvial, para el cálculo de flujo de ríos; permite definir las zonas inundables, evaluar zonas de riesgo y delimitar las vías de intenso desagüe; simula el paso del agua bajo puentes, compuertas y vertederos, pudiendo incluir efectos del viento, entre otras aplicaciones. El modelo dispone actualmente de 3 módulos principales de cálculo: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Para el presente trabajo de titulación solamente analizaremos el módulo de turbulencia. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros”(Flumen 2010).

Iber incluye entornos de Pre-proceso de datos y Post-proceso de resultados basados en el sistema GiD siendo este un pre y post procesador universal adaptable y fácil de usar para simulaciones numéricas en ciencia e ingeniería. Ha sido diseñado para cubrir todas las necesidades comunes en el campo de simulaciones numéricas desde el pre-procesamiento posterior. El software Iber también posee aplicaciones CAD las cuales permiten importar y exportar archivos en formato DXF directamente desde estas aplicaciones, importar imágenes georreferenciadas, y determinar la rugosidad de fondo de forma automática; en el pos proceso dispone de la visualización de campos 2D escalares y vectoriales, zonas de riesgo, zonas inundables y frentes seco-mojado no estacionarios; da resultados sobre imágenes geo-referenciadas, extracción de secciones y perfiles longitudinales, exportación de resultados en formato raster y creación de videos con animación de resultados (Bladé et al., 2014).

“La eficiencia en el cálculo de dicha aproximación depende, en parte, de la facilidad de implementación del algoritmo y de las características especiales y limitaciones de los instrumentos de cálculo (los computadores)”.(Seminario 2012)

2.1.3 Fundamentos hidráulicos del modelo.

La totalidad de los flujos analizados en lámina libre para ríos, canales y zonas costeras se los realiza en entornos turbulentos, en donde se observa mejor las zonas de remolinos, zonas muertas o de baja velocidad, y que pueden evidenciarse en este trabajo de titulación debido a que en el modelo numérico se visibilizan zonas muertas que afectan al mezclado del coagulante y polímero, (sustancias químicas utilizadas para la desestabilización de los coloides) por lo que dichas zonas juegan un importante papel tanto en la hidrodinámica como en la difusión de sustancias solubles y de sólidos en suspensión.

El comportamiento de un fluido viscoso está gobernado por las ecuaciones de Navier Stokes; debido a su complejidad no posee solución analítica salvo en ciertos casos particulares (Bladé et al., 2014). A partir de estas ecuaciones y asumiendo diversas hipótesis simplificadas, se obtiene el sistema de ecuaciones en dos dimensiones, conocido como ecuaciones de Saint-Venant. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Saint-Venant, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad (Brufau, Vázquez-Cendón, & García-Navarro, 2002).

Las ecuaciones resueltas en el modelo, se expresan en términos de la conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

Ecuación 1. (Conservación de la masa y Momento)

$$\begin{aligned} \frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h * U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{gh^2}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{exx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{exy}}{\partial y} + M_x \end{aligned}$$

Ecuación 2. (Conservación de la masa y Momento en dirección eje X)

$$\begin{aligned} \frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h * U_y^2}{\partial y} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} \\ = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{gh^2}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{exy}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{eyy}}{\partial y} + M_y \end{aligned}$$

Ecuación 3. (Conservación de la masa y Momento en dirección eje Y)

en donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, $\tau_{b_}(x,y)$ es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{exx} , τ_{exy} , τ_{eyy} son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros. (Bladé et al., 2014).

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \frac{\rho g h n^2 U_x |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}}$$

Ecuación 4. (Fricción debido al rozamiento de fondo en dirección eje X)

$$\tau_{b,y} = \frac{\rho g h n^2 U_y |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}}$$

Ecuación 5. (Fricción debido al rozamiento de fondo en dirección eje Y)

En donde: $|U|^2$ es la velocidad tangencial a la pared de la estructura, en los contornos de entrada se fija el caudal de agua y se asume que la dirección del flujo es perpendicular al contorno.

CVD es un coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión:

$$|V10| < 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow \text{Para calcular } CVD$$

Ecuación 6. (Velocidad del viento)

$$CVD = 1.2 \times 10^{-6} + 2.25 \times 10^{-6} * \left(1 - \frac{5.6}{|V10|}\right)^2$$

Ecuación 7. (Función de Velocidad del viento)

Donde $V10$ son componentes de la velocidad del viento a 10m de altura, $|V10|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10m de altura.

2.2. Características de las agua de los ríos.

Los ríos constituyen los sistemas acuáticos continentales más importantes; la calidad de sus aguas se describe a través de variables físicas, químicas y bacteriológicas, las cuales normalmente pueden resumirse en un Índice de Calidad. (Ramírez, 2011)

2.2.1 Características Organolépticas

Son las variables que inciden directamente en la estética del agua, pueden ser apreciados por los sentidos y se los cataloga como características organolépticas. Los más importantes desde el punto de vista de la tratabilidad se resumen a continuación:

Turbiedad. Es la capacidad que presenta el material suspendido en el agua para obstaculizar el paso de la luz, interfiriendo en la fotosíntesis de los ecosistemas acuáticos de los ríos. Se expresa en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbiedad); una unidad corresponde a la turbiedad que presenta una solución que por litro contiene un 1 mg de SiO_2 estandarizada. La medición de la turbiedad es rápida, económica y de fácil interpretación.

La turbiedad puede tener un origen inorgánico debido a la erosión de la cuenca del río, la cual aporta sedimentos en los cauces, pero también puede ser orgánico cuando es contribuida por las actividades antrópicas, como la descarga de aguas residuales domésticas. (Ramírez, 2011)

Constituye un parámetro ampliamente aplicado como criterio de calidad de agua en fuentes de abastecimiento desde el punto de vista estético al generar rechazo en el consumidor y puede incidir en procesos de potabilización.

Color. Se genera por sustancias disueltas de origen inorgánico y por los coloides orgánicos que contiene el agua. Se mencionan el color aparente y el color verdadero. El color aparente es el que se mide incluyendo las partículas suspendidas, y el verdadero es el que queda cuando el material suspendido (turbiedad) es removido.

El color proveniente de la descomposición natural de la materia vegetal de las plantas y de la disolución de ciertos minerales presente en el subsuelo de la cuenca del río, no tiene incidencia fisiológica, pero ocasiona rechazo en los consumidores; ciertas industrias también pueden generar efluentes coloreados, cuyo origen puede ser tóxico.

Olor. Es debido a la presencia de sustancias indeseables en el agua como: plancton, compuestos orgánicos generados por bacterias y algas, desechos industriales y descomposición de la materia orgánica. (Ramírez, 2011)

No existen instrumentos para determinar el olor del agua por lo que éste se reporta en los análisis de aguas como presente o no presente.

2.2.2 Parámetros Físicos

pH. Es un término empleado para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o básicas del agua. Origina cambios en la flora y fauna de los cuerpos de agua y posee influencia sobre la toxicidad de compuestos como: amoníaco, metales pesados, hidrógeno sulfurado, entre otros. (Ramírez, 2011). Desde el punto de vista de la tratabilidad, el pH del agua interviene en la neutralización de los agentes coagulantes como el sulfato de aluminio, utilizados en la remoción de las partículas coloidales.

Temperatura. Tiene influencia en el desarrollo de la fauna y la flora presentes en las corrientes de agua especialmente cuando existen variaciones; puesto que eleva el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua y provoca la disminución del oxígeno disuelto, aspecto importante para mantener las condiciones aerobias en los ambientes acuáticos. (Ramírez, 2011). La temperatura tiene total influencia en todos los mecanismos de cinética química que ocurren en el agua, como: reproducción de los microorganismos, descomposición de la materia orgánica, acción de los agentes desinfectantes, etc. (Catalán de la Fuente, 2015)

Conductividad. Se mide en $\mu mhos/cm$; evalúa la presencia de sales en forma ionizada. Su valor permite establecer relaciones con los sólidos disueltos en los cuerpos de agua. (Ramírez, 2011)

Sólidos. Existen diversas formas de sólidos: suspendidos y disueltos, a su vez cada uno de éstos pueden ser volátiles es decir de origen orgánico, o fijos de origen inorgánico; algunas partículas tienen un peso específico mayor al del agua y sedimentan constituyendo los sólidos sedimentables cuya naturaleza puede ser orgánica o inorgánica. (Pauta G., 2014)

2.2.3 Parámetros Químicos

Para estudios de tratabilidad del agua son importantes los siguientes parámetros químicos:

Acidez. La adición del coagulante al agua cruda generalmente produce un descenso del pH dependiendo de la dosis adicionada, por lo que puede corregirse las características físicas pero afectarse las químicas; el intervalo de pH para las aguas de consumo está entre 6 y 8. En las corrientes de agua generalmente la acidez es inferior a 8.5; pero por la presencia de ácidos fuertes provenientes de las descargas industriales y fábricas y de dióxido de carbono que es un componente propio de los ríos, se produce una acidez mineral que ya es peligrosa. (Ramírez, 2011).

Alcalinidad. Es la capacidad que posee el agua para neutralizar los ácidos. En altas concentraciones produce un sabor desagradable del agua; en presencia de iones de Ca o Mg y bajo ciertas condiciones de temperatura y pH, forma precipitados que obstruyen el flujo en las tuberías e interfiere en los procesos de tratamiento de agua potable y aguas residuales. En el tratamiento del agua es importante su valor, puesto que amortigua al coagulante de carácter ácido, evitando un descenso significativo del pH del agua tratada. Se mide por titulación y se expresa en mg/l de CaCO_3 .

Dureza. Es ocasionada por la presencia de cualquier catión bivalente especialmente Ca^{2+} y Mg^{2+} . Se mide por titulación y se expresa en mg/l de CaCO_3 . Es un parámetro que se origina de manera natural en el agua debido a la disolución de formaciones rocosas presentes en el suelo.

Grasas. La presencia de grasas en el agua se debe a las actividades antrópicas. Compuestos como: hidrocarburos, ésteres, aceites, ceras y ácidos grasos de alto peso molecular son considerados como grasa ya que son solubles en hexano. (Ramírez, 2011)

En las aguas superficiales (ríos) ocasionan películas que interfieren en la transferencia de la luz y del oxígeno disuelto. En cantidades excesivas disminuyen la eficiencia de los tratamientos biológicos.

Detergentes. Consiste en la variedad de materiales empleados en el lavado de la ropa. Pueden ser clasificados en dos grupos: detergentes LAS (Alkyl-benceno Sulfonato Lineal) y detergentes ABS (Alkyl-benceno Sulfonato Ramificados). (Ramírez, 2011)

Los primeros son biológicamente degradables, mientras que los otros no lo son.

Hierro y manganeso. La presencia de estos dos elementos en aguas superficiales se debe al poder disolvente que tiene el dióxido de carbono sobre los estratos del suelo reduciendo los compuestos férricos a hierro soluble. (Ramírez, 2011)

Concentraciones mayores de 0,3 mg/L de Fe y de 0,1 mg/L de Mn crean problemas en cuanto a la calidad de agua en los sistemas de agua potable.

Nitrógeno. El nitrógeno total está compuesto por el nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003).

El nitrógeno amoniacal presente en el agua puede reducir los niveles de oxígeno disuelto; la presencia de nitritos conjuntamente con aminas secundarias producen las nitroso-aminas que son de carácter cancerígeno y el nitrógeno como nitrato provoca daños en la salud, especialmente en niños. (Ramírez, 2011)

Fósforo. Es fundamental en el crecimiento de algas y de otros organismos biológicos. Las formas más frecuentes que se presentan son: orto fosfato, poli fosfato y fosfatos orgánicos. Raramente se presenta en concentraciones elevadas puesto que las plantas lo absorben rápidamente. (Ramírez, 2011)

Demanda Bioquímica de oxígeno DBO. Es un parámetro muy significativo cuando se trata de determinar la carga contaminante que generan los desechos domésticos e industriales de carácter orgánico al ser descargados en los ríos, en los que persisten condiciones aeróbicas. (Ramírez, 2011)

2.2.4 Parámetros Bacteriológicos

La contaminación fecal de las aguas superficiales que sirven como fuente de abastecimiento es uno de los problemas prioritarios para la salud humana y ambiental (Arcos Pulido *et al.*, 2005). Los indicadores de uso más frecuente son:

Coliformes Totales. Son indicadores de la contaminación del agua; tienen un origen fecal de humanos y animales, pero también pueden estar presentes en otros ambientes como la madera húmeda, cierto tipo de vegetación y aguas de ciertas características; por eso actualmente no son muy utilizados al evaluar la calidad microbiológica del agua. (Larrea J, et al..2012).

Coliformes Fecales o termorresistentes. Son indicadores más específicos de contaminación fecal, sobre todo *Escherichia Coli* que es de auténtico origen fecal, por lo tanto es un indicador directo del riesgo de contaminación debido a la presencia de bacterias patógenas, puesto que proviene del sistema gastrointestinal del hombre y de los animales de sangre caliente, en donde también se encuentran los organismos patógenos. (Cambruzzi N, 2016)

2.3 Fundamentos del sistema convencional de tratamiento simulado.

En la mayoría de los casos las fuentes superficiales usadas para los abastos de agua, presentan características físicas y microbiológicas objetables que deben ser corregidas para alcanzar estándares de calidad exigidos en la Normativa Ecuatoriana INEN 1108. *“Requisitos de calidad para agua destinada a consumo humano”* (Norma técnica de calidad 1108); los parámetros a corregir frecuentemente son el color, (< a 20 UC. Pt-Co), y la turbiedad (< a 2 NTU FTU); otro aspecto importante que debe ser considerado es la calidad microbiológica del agua distribuida; la referida norma establece en forma obligatoria la ausencia de

microorganismos indicadores de contaminación fecal, (Coliformes Totales y Fecales ≤ 2 NMP/100 ml).

Para tal objetivo el tratamiento normalmente aplicado es el Sistema Integrado denominado convencional, que incluye las siguientes operaciones y procesos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección; eventualmente este tratamiento puede también remover sustancias químicas como hierro y manganeso en estado coloidal.

El agua no existe pura en la naturaleza, pues contiene sustancias que pueden estar en suspensión o en solución verdadera según el tamaño de disgregación del material que acarrea.

La turbiedad es debida a la presencia de partículas provenientes de la erosión del suelo, a algas o a crecimientos bacterianos.

El color está constituido por sustancias químicas, que provienen de la degradación de la materia orgánica, tales como hojas y plantas acuáticas con las cuales el agua entra en contacto. Es importante el conocimiento y la naturaleza de estos contaminantes para entender los mecanismos de remoción que se llevan a cabo en el sistema de tratamiento simulado (Arboleda J, 2000).

El sistema de tratamiento mencionado, tiene por objeto tres tareas fundamentales: a) separación de sustancias particuladas como arena y arcilla, materia orgánica, bacterias y algas; b) extracción de sustancias disueltas, como las que causan color, y c) destrucción de bacterias y virus patógenos. (Glinn H. et al., 1999)

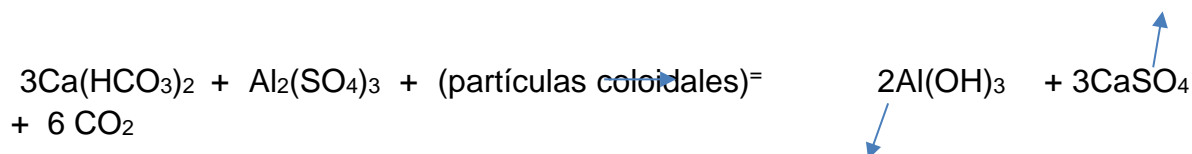
2.3.1 Coagulación.

Este proceso desestabiliza las partículas coloidales causantes del color natural del agua; el origen del color es debido a la presencia de un conjunto de sustancias de origen vegetal, denominadas “sustancias húmicas”, entre las cuales pueden citarse: ácido húmico, humatos, ácidos fúlvicos y otros. Estas partículas se caracterizan por su pequeño tamaño, entre 1 y 400 nm; por su gran área superficial, esto significa que en un pequeño volumen de ellas, existe una gran superficie que le confiere propiedades de adsorción; y finalmente poseen cargas eléctricas negativas que las mantienen en un constante estado de repulsión, confiriéndolas gran estabilidad.

La desestabilización de las partículas coloidales se consigue mediante la adición de una sustancia que aporte cargas positivas capaces de neutralizar las cargas negativas de ellas, y se denominan coagulantes; el más utilizado es el sulfato de aluminio en forma de alumbre $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}]$; para que la reacción sea eficiente se requiere una dosis óptima de coagulante y gran energía de agitación que permita una mezcla íntima entre la masa de agua a tratar y el coagulante aplicado; esto se

consigue en una cámara de mezcla rápida donde se produzca un punto de turbulencia hidráulica; el coagulante normalmente es una sal metálica que reacciona con la alcalinidad del agua para producir un flóculo insoluble de hidróxido del metal $\text{Al}(\text{OH})_3$ el cual incorpora a las partículas coloidales provocando su arrastre. (Arboleda J, 2000).

Químicamente el proceso puede representarse así:



2.3.2 Floculación.

Esta etapa tiene por objeto aglomerar las partículas de coloides desestabilizadas en la etapa anterior; esto se consigue con una suave turbulencia que se aplica al agua, a fin de permitir la adsorción de las partículas para aumentar su peso y tamaño y constituir flóculos grandes, pesados, que puedan sedimentar con facilidad. En este proceso intervienen fuerzas del tipo Van der Vals y otras que ayudan en la aglomeración. El número de colisiones entre partículas está relacionado directamente con el gradiente de velocidad y es posible determinar la potencia que se requiere para dar un grado particular de floculación como se especifica por el gradiente de velocidad.

El tiempo requerido para esta operación así como el gradiente aplicado, depende de la naturaleza propia de cada agua; generalmente puede variar de 20 a 50 minutos y el gradiente puede ser descendente o constante y varía entre 20 a 80 seg^{-1} .

Para optimizar el proceso de floculación se usan los polímeros o polielectrolitos los cuales actúan formando flóculos de mayor tamaño, mejorando la sedimentación.

2.3.3 Sedimentación.

En esta etapa del tratamiento se separan los flóculos formados anteriormente, los cuales descienden por efecto de la gravedad. La sedimentación se produce en los decantadores; es ahí donde el flóculo se deposita en el fondo constituyendo “los lodos”, que posteriormente deben ser dispuestos mediante técnicas establecidas, puesto que se trata de residuos peligrosos. El tiempo requerido depende fundamentalmente del tamaño de los flóculos; los sedimentadores normalmente son de alta taza con placas inclinadas.

2.3.4 Filtración.

Es el proceso físico mediante el cual el agua pasa por un material fino llamado filtro. En esta unidad se eliminan los pequeños flóculos o partículas de menor tamaño que no se han sedimentado.

En las plantas convencionales se utilizan los filtros rápidos, denominados así por la velocidad con la ocurre el proceso, a diferencia de la filtración lenta que también se aplica en la purificación del agua. Aspectos importantes distinguen estas dos tipos de filtración, como: velocidad de filtración, tamaño y profundidad del lecho, tamaño de la arena, distribución del tamaño de granos de arena en el filtro, sistema de drenaje inferior, pérdida de carga, penetración de la materia suspendida. (Fair, Geyen, Okum, 1979)

2.3.5 Desinfección.

La desinfección es la etapa final en el sistema de tratamiento del agua; normalmente el desinfectante usado es el cloro por su gran capacidad oxidativa que destruye las formas celulares de varios microorganismos que se encuentran en el agua, algunos de los cuales pueden ser patógenos, es decir son causantes de enfermedades hídricas como el cólera, la fiebre tifoidea, salmonelosis y otras. Por su alto poder oxidativo se le emplea para el control de olores y sabores; también oxida el hierro (II) y el manganeso (II) en los suministros de aguas freáticas. (Snoeyink V, Jenkins D, 1990).

La eficiencia de la desinfección depende de factores como: dosis del desinfectante, tiempo de contacto con el agua, y las condiciones de agitación. (Ordóñez Galo, 2005)

2.3.6 Estudios de caracterización y tratabilidad.

Para conocer la capacidad de respuesta del agua frente a este mecanismo de tratamiento convencional, es necesario realizar ensayos de laboratorio, como las pruebas de jarras, o los “test jar”, a través de los cuales se determinan los parámetros óptimos para la potabilización del agua, como: dosis de químicos a usarse, los períodos de cada una de las etapas, las gradientes de velocidad, etc., y que constituyen los parámetros de diseño para la planta. Es importante que estos ensayos se realicen en diferentes períodos climatológicos cuando la fuente es superficial, puesto que la calidad del agua es variable dependiendo de esta condición; cuando es posible se puede también utilizar una planta a escala piloto que permite una mejor representatividad de los resultados obtenidos.

CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación y área estudio

La presente investigación es experimental, ya que a través de mediciones y ensayos realizados en la estructura piloto, se obtendrán resultados que permitan validar la modelación física, realizar la modelación numérica, y obtener los parámetros de dosificación para el tratamiento convencional del agua del río Tomebamba.

La planta piloto se construyó dentro del parque El Paraíso, a 200 metros de las Facultades de Ciencias Médicas y Odontología de la Universidad de Cuenca, en la ribera del río Tomebamba en las coordenadas 723633.00 m E: 9678297.00 m S, mostrado en la **Figura 1**.



Figura 1. Ubicación de modelo físico en parque el Paraíso Fuente (Propia)

3.2 Descripción de la estructura construida y ensayos realizados.

El modelo físico consta de dos vertederos, uno a la entrada y otro a la salida, los cuales permiten regular el flujo de agua que ingresa; está compuesto por 6 vanos por los cuales circula el agua en régimen subcrítico; después del primer vertedero se ubica el cuenco dissipador en donde por la caída del agua se produce un resalto hidráulico, punto ideal para adicionar el coagulante y efectuar la mezcla rápida. La estructura está construida de hormigón por lo que es necesario introducir el coeficiente de Manning de 0.014 (Fuente: Bolinaga, J. J. "Drenaje Urbano" INOS 1979), utilizado posteriormente para el análisis del modelo numérico. (ver ANEXO).

Cuando el agua ingresa a la cámara de mezcla lenta y luego de un recorrido de 2 metros ya en el primer vano del floculador, el flujo alcanza una velocidad optima, entonces se adiciona el polímero que al mezclarse con el agua aumenta la eficiencia de la floculación; en el primer vano el número de Froude según análisis numérico toma un valor de 1.15 lo que representa un flujo supercrítico correspondiente a un Resalto Hidráulico ondular en donde la superficie libre presenta ondulaciones y la disipación de energía es baja, inferior al 5%. (Flumen, 2010)

En el modelo se verificaron también las condiciones de auto limpieza después del proceso; es posible la sedimentación de flóculos formados y con suficiente peso; también la deposición de hojas, piedras, pequeñas ramas, etc. que interferirán con los procesos a simular: coagulación y floculación.

La **Figura 2** visualiza el piloto construido en la orilla del río Tomebamba.



Figura 2. Planta Piloto. Fuente (Propia.)

Se realizó un ensayo de trazadores, para obtener el período de retención en el floculador de la planta piloto, utilizando un trazador salino (cloruro de sodio), detectando su presencia por medición de la conductividad eléctrica; para este ensayo se utilizó la sonda marca EXO modelo 2, la cual también registra valores de

temperatura, variable indispensable para el cálculo del gradiente hidráulico respectivo.

3.3 Correlación entre modelo físico y el modelo a escala de laboratorio.

Para la correlación entre el modelo físico y el modelo de laboratorio, se toman muestras del río Tomebamba (agua cruda), las cuales son preservadas en condiciones de refrigeración y son transportadas al Laboratorio de Sanitaria para el análisis correspondiente. Se determinan algunos parámetros físicos y químicos y luego se procede a los ensayos de tratabilidad para establecer las dosis óptimas de reactivos químicos: el sulfato de aluminio como coagulante y el polímetro como ayudante de floculación, manteniendo constante el tiempo de floculación de 23 minutos y una gradiente de 63 segundos⁻¹, variables ya establecidas en la estructura piloto; así se encuentra que para cada tipo de agua, de color y turbiedad conocida hay una dosis de coagulante y polímero que consigue la mejor calidad del efluente. Posteriormente estas dosis de sustancias químicas se reproducen en la planta piloto para simular la coagulación y la floculación y adicionalmente simular el proceso de sedimentación pasando el efluente que sale del floculador a un tanque en donde se deja sedimentar por 30 minutos (agua sedimentada).

Para permitir el ingreso de un caudal constante e igual a 1.875l/s, es necesario calibrar el limnómetro, estableciendo la ecuación del vertedero ubicado a la entrada de la planta piloto.

3.3.1 Ensayos de laboratorio.

Se determinan las dosis óptimas de coagulante y ayudante de coagulación para cada muestra de agua cruda, manteniendo constante los parámetros de floculación: gradiente y período de retención. Para esto se utiliza el equipo de Jarras del Laboratorio de Sanitaria de la Universidad de Cuenca; el mismo que dispone de un sistema de iluminación que permite observar la formación de flóculos. **Figura 3.**

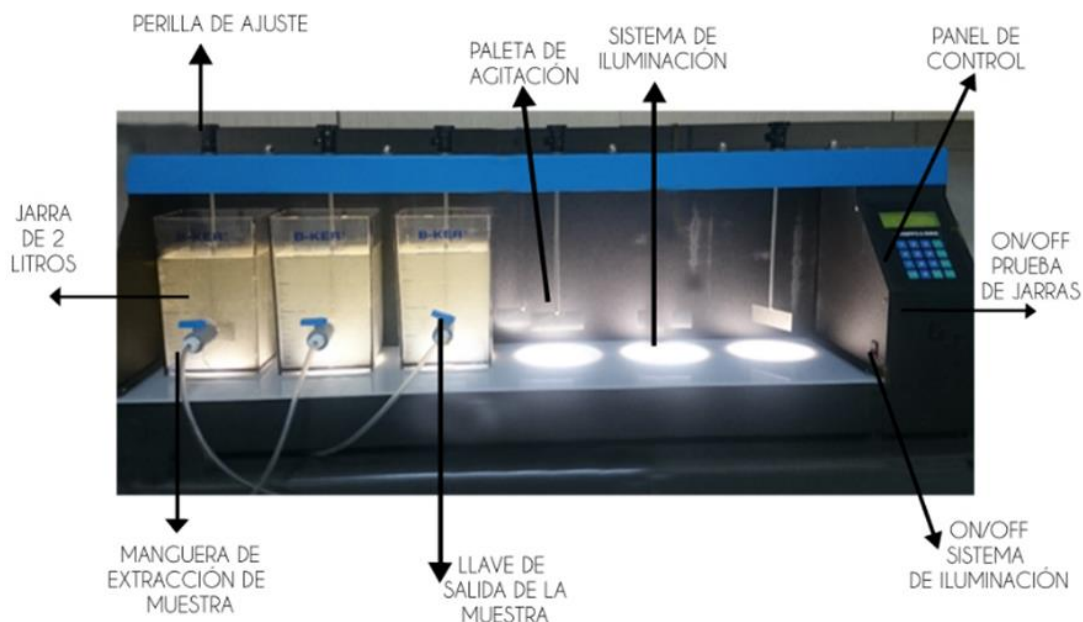


Figura 3. Equipo ISA, ensayo de jarras, Fuente catalogo Laboratorio de Sanitaria-Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca

Para el ensayo se selecciona un rango de dosis y se obtiene la “dosis óptima de coagulante”; posteriormente se determina la “dosis óptima de ayudante de floculación” o polímero manteniendo constante en todas las jarras la dosis óptima de coagulante ya establecida.

Características del agua cruda. Los parámetros de control a registrarse son los siguientes: Color, turbiedad, pH, alcalinidad, hierro total, manganeso, conductividad.

Características del agua sedimentada. Color, turbiedad, pH y alcalinidad.

Características del agua filtrada. Color, turbiedad.

Adicionalmente se determinan otros parámetros de calidad como: alcalinidad, pH, cobre, manganeso, hierro, cloruros, sulfatos, conductividad, tanto en el agua cruda como en la tratada.

3.3.2 Ensayos en la planta piloto.

Una vez establecidas las dosis óptimas de químicos en el laboratorio éstas se aplican en la planta piloto, calculando el volumen de las soluciones para mantener un período de floculación de 23 minutos; posteriormente el agua se sedimenta durante 30 minutos y se miden los parámetros de control.

Características del agua sedimentada: color, turbiedad, pH y alcalinidad.

Características del agua filtrada: color, turbiedad.

Se establece la similitud de los resultados obtenidos en ambos ensayos.

3.3.3 Medición de flujo en el vertedero

La **Ecuación 8** nos permite estimar la altura de agua sobre el vertedero.

$$Q = Cdh^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 8. Ecuación de vertedero cresta delgada (2D 2015)

La **Ecuación 9** nos permite el cálculo de vertedero cresta delgada.

$$0.001875 = 0.6164 * h^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 9. Ecuación de vertedero cresta delgada desarrollada (altura).

El procedimiento empírico para determinar caudales, mediante métodos volumétricos y control de tiempo, se refleja en la **Ecuación 10**.

$$Q_{calibracion} = k * H^n$$

Ecuación 10. Ecuación de vertedero cresta delgada (altura).

En donde:

k= Logaritmo inverso del termino independiente de la recta de ajuste según ecuación de grafico 2.

n= Pendiente de la recta ajustada según grafico 2.

H= Altura de agua de acuerdo a la base de del vertedero.

Para luego obtener el caudal de calibración:

$$Q_{calibracion} (l / s) = 0.0076 * H^{2,273}$$

3.4 Unidad de mezcla rápida para la coagulación.

En el modelo físico se determinó un periodo promedio de retención para la unidad de mezcla rápida de 3 segundos, con un caudal de diseño en el vertedero de entrada de 1.875 l/s, luego mediante la **Ecuación 11** se calcula el volumen de la unidad que posteriormente será utilizada en el cálculo del gradiente de velocidad, según la **Ecuación 12**.

$$t_0 = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 11 (Volumen de la estructura)

Donde:

T_o = Tiempo de retención de la unidad de mezcla rápida,
determinado mediante ensayo de trazadores

V = Volumen en m^3 de la unidad de mezcla rápida.

Q = Caudal en $\frac{l}{s}$ aforado en el vertedero de entrada.

Sustituyendo los valores de caudal y de tiempo de retención, 1.875 l/s y 3s (0.05min) en la **Ecuación 11** se obtiene el volumen de la unidad de mezcla rápida y el mismo proceso se emplea en el cálculo del volumen en la unidad de mezcla lenta

Para el cálculo de la gradiente de velocidad en la unidad de mezcla rápida es necesario determinar la pérdida de carga, la cual se obtiene de la medición de los lados de la estructura en la planta piloto. **Figura 4.**

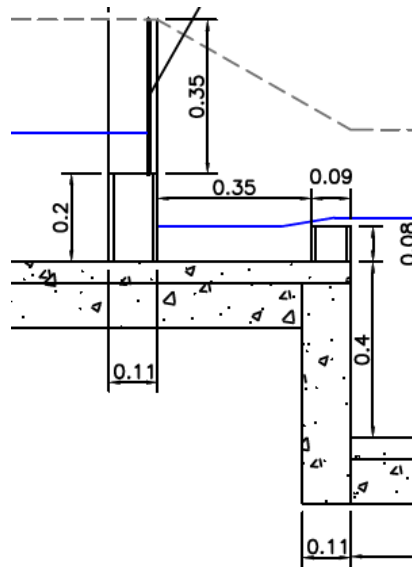


Figura 4. Perfil de unidad de mezcla rápida, Fuente (Propia).

Acorde a este valor se obtiene el gradiente de velocidad.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \sqrt{\frac{H}{T_r}}$$

Ecuación 12 (Gradiente de velocidad)

En donde:

$$G = \text{Gradiente de velocidad} \left(\frac{1}{s^{-1}} \right)$$

$$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} = \text{Funcion de temperatura, a partir de la tabla 2 y el gráfico 1}$$

H = Perdida de carga (m) de agua en la unidad de mezcla rapida.

T_r = Tiempo (minutos) de retención real de la unidad de mezcla rapida.

La expresión $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ función de temperatura se obtiene de acuerdo a un modelo de regresión lineal representado en el **Gráfico 1** mediante el modelo de regresión de la **Tabla 2**. (Villegas, R. A. y R. D. Letterman, 2016).

En la **Tabla 1**, se muestran los promedio de temperatura y volumen de agua obtenidos, y empleando como referencia los datos de la **Tabla 2**.

	ENSAYOS			
ENSAYO	FECHA	TEMPERATURA (°C)	$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$	VOLUMEN: m ³
Promedio de ensayos	22/11/2018	15.83	2956.02	0.005625

Tabla 1. Resultados de temperatura y función de temperatura, de acuerdo a la tabla 2, Fuente (Villegas, R. A. y R. D. Letterman.2016.)

TEMPERATURA °C	$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$
0	2337
4	2502
10	2737
15	2920
17	2998
20	3115
25	3267

Tabla 2. Valores de función de temperatura Fuente (Villegas, R. A. y R. D. Letterman. 2016.)

En el **Gráfico 1** se presenta la correlación entre la temperatura y la función de temperatura.

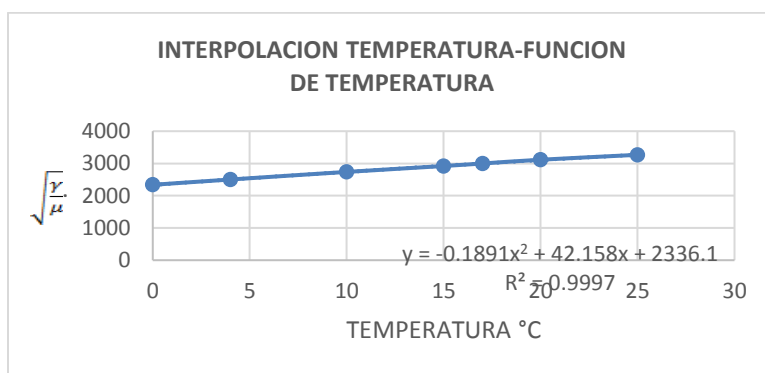


Gráfico 1. Modelo de regresión polinómica, interpolación de temperatura a los 15.83 °C,

Fuente (Propia).

En la unidad de mezcla rápida se registra una pérdida de carga (H) casi imperceptible correspondiente a 2cm a lo largo de 35cm de producirse el resalto hidráulico después del vertedero de entrada. **Figura 4.**

Reemplazando en la Ecuación 12 los valores de pérdida de carga (H), tiempo de retención T_r y función de temperatura a partir de la tabla 2, correspondientes a una temperatura de 15.83, se obtiene el valor de G.

Se muestra la unidad de mezcla rápida en planta, en donde se da la mezcla del coagulante (Solución de sulfato de aluminio al 1%) con el agua, en el punto del resalto hidráulico que se produce en la unidad. **Figura 5.**

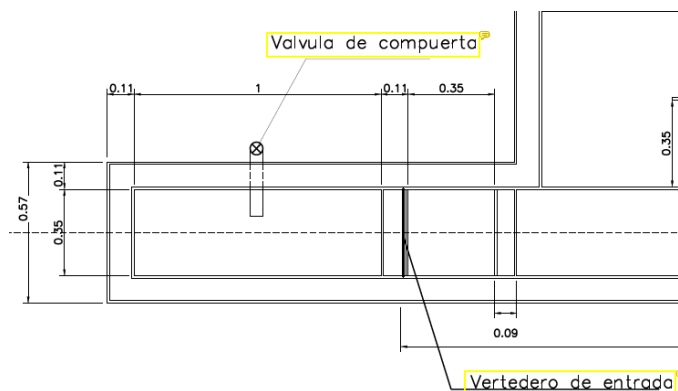


Figura 5. Planta de unidad de mezcla rápida, Fuente (Propia).

3.5 Unidad de mezcla lenta para la floculación.

En la unidad de mezcla lenta representada en las **Figuras 6, 7, y 8** se determinara el tiempo de retención, el volumen total de agua sobre la estructura, y el gradiente de velocidad, según procedimiento empleado para mezcla rápida.

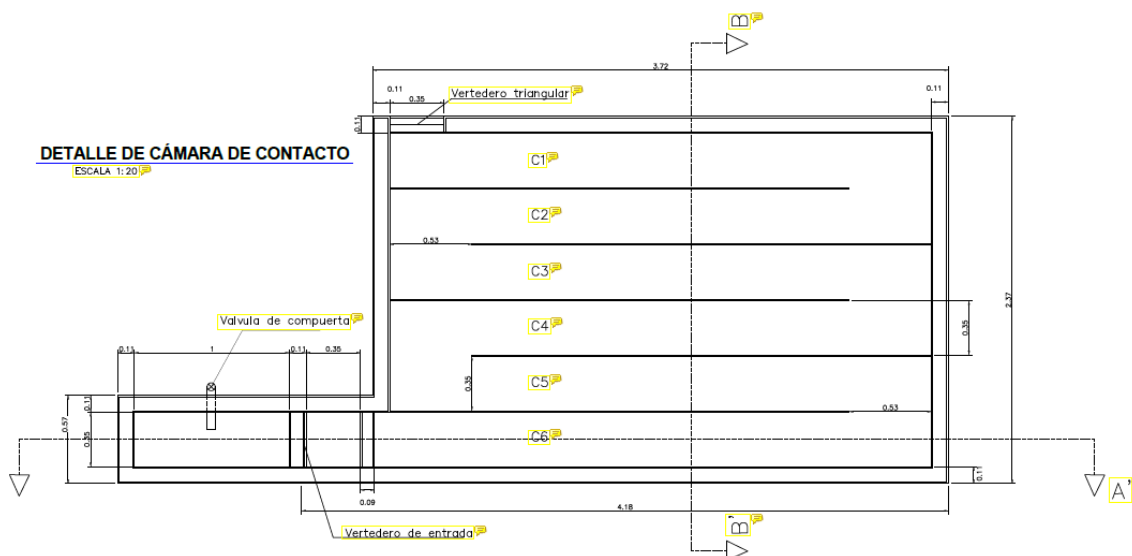


Figura 6. Planta de unidad de mezcla lenta, escala 1:20, Fuente (Propia).

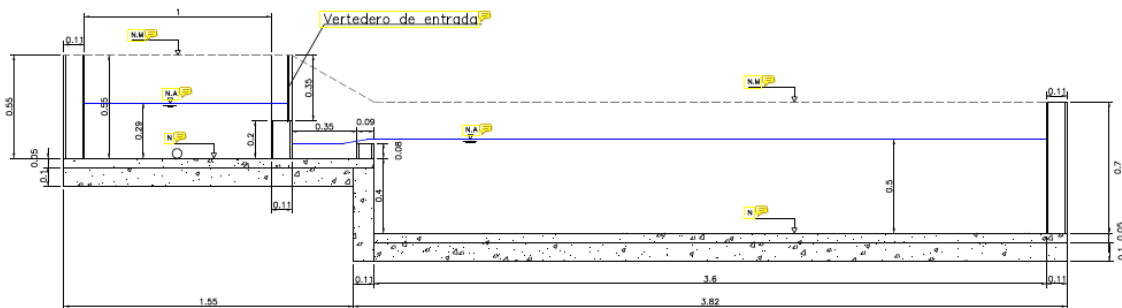


Figura 7. Corte A-A de unidad de mezcla lenta, escala 1:20, Fuente (Propia).

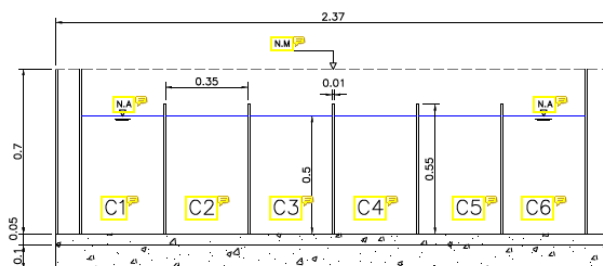


Figura 8. Corte B-B de unidad de mezcla lenta, escala 1:20, Fuente (Propia).

La relación de pérdida de carga en cada vano, se muestra en la **Tabla 3**.

Vano	Perdida de carga (cm)
1	9.8
2	9.1
3	8.42
4	8.31
5	7.51
6	7.48

Tabla 3. Relación de vanos con pérdida de carga respectivamente. Fuente (Propia).

Así se obtiene el valor de gradiente hidráulico.

Adicionalmente se calculan parámetros hidráulicos como: velocidad de flujo, períodos de retención mediante el ensayo de trazadores, etc., los cuales serán

corroborados con el modelo numérico realizado en IBER. El objetivo principal de la estructura será proporcionar a la masa de agua una agitación lenta aplicando velocidades y gradiente constante para promover el crecimiento de los flóculos y la conservación de sus características a lo largo de los 6 vanos presentes hasta que la suspensión salga de la estructura.

“La energía que producirá la agitación del agua puede ser de origen hidráulico o mecánico”. (Cepis 1998)

En el presente trabajo se aplicará agitación hidráulica.

3.6 Validación de modelo físico.

Para la validación del modelo físico se realizó la medición de velocidades, zonas muertas y periodo de retención, los cuales fueron comparados con los desarrollados en el software IBER, mostrados en las figuras 25-32 en donde se detalla el calado de agua, el número de Froude, la velocidad, y zonas muertas presentes en el modelo numérico y físico respectivamente.

En el modelo físico se analizaron las dimensiones propuestas en comparación con el diseño original planteado por (Dad and Agua 2000), en donde se replica un ancho de vanos de 2cm, no mostrados en la construcción final; se muestran vanos de 4cm. de ancho debido a la utilización de acero para la conformación de la estructura.

3.7 Modelación numérica de la estructura (Iber).

Los parámetros hidráulicos con los que se corre el modelo, se detallan a continuación:

Parámetros del tiempo en el software Iber, se consideran tomando en cuenta lo establecido en la **Tabla 4**.

Simulación	Nueva
Instante Inicial [s]	0
Tiempo máximo de simulación [s]	800
Intervalo de resultados [s]	20
Opciones de tiempo	Mostrar

Tabla 4. Parámetros de tiempos de simulación.

Como parámetros generales del modelo numérico se considera la parte del hardware a usarse; con esta pestaña se fijan algunos parámetros de cálculo y del esquema numérico.

Número de procesadores: Iber puede lanzar un cálculo paralelo con el número de procesadores que se desee indicados en la pestaña en donde se tomara en cuenta el número máximo de procesadores en el Sistema; caso contrario Iber tomara el numero por defecto de procesadores 1.

Función Limitadora de flujo: Mediante el cual se puede escoger un esquema numérico de primer orden o de segundo los cuales nos permiten limitar el flujo a utilizarse.

CFL: correspondiente al valor de Courant-Friedrich-Levy el cual deberá ser modificado para conseguir un esquema numérico estable.

Limite Seco-Mojado: Umbral a considerarse en el modelo para clasificar a un elemento como seco y no se realice un cálculo hidrodinámico en él.

Límite almacenamiento elementos secos: Cuando en un instante de tiempo un elemento tiene un calado negativo, Iber por defecto lo considera seco, y guarda en memoria el valor de dicho calado negativo. Para volver a estar mojado, el elemento debe llenar antes este “calado negativo”. Es posible fijar el valor de este “calado negativo” o incluso limitarlo a cero, con ello se ganará algo de precisión en el proceso de mojado y secado, pero se reducirá el incremento de tiempo de cálculo y aumentará, por lo tanto, el tiempo de cálculo total.

Resultados. En la pestaña de resultados solamente se visualizaran los resultados que se quieran conocer sean estos de, velocidad, calado, flujo de agua, numero de Froude, etc. Únicamente los valores que no se introdujeron deberán volver a procesarse.

Turbulencia. En donde se permite elegir algún modelo de turbulencia, en nuestro caso se vinculara el modelo con velocidad constante, mediante el cual nos permite controlar la entrada de flujo a la estructura para analizar a detalle el comportamiento de los valores, de velocidad, calado, numero de Froude, etc.

Sedimentos. La pestaña Sedimentos permite activar o desactivar los módulos de cálculo de transporte de sedimentos por arrastre de fondo y en suspensión, así como fijar los parámetros de los mismos. Los detalles de los modelos se presentan en el Manual de Referencia.

Tanto para transporte en suspensión, como para transporte de fondo, es posible activar o desactivar el modelo de avalancha.

Es posible fijar un instante de inicio de cálculo del transporte de sedimentos distinto al del cálculo hidrodinámico. De esta manera se puede, por ejemplo, obviar los procesos de erosión y sedimentación hasta que las condiciones de velocidad y

calado se estabilicen. Para el presente proyecto no se analizarán el comportamiento de los sedimentos en la estructura, debido a que es una obra de baja envergadura y no existe la acumulación de sedimentos perceptible en el modelo físico.

Vía Intenso-desagüe. No existe en el modelo numérico umbrales de análisis o polígonos limitantes por lo que para el estudio del modelo numérico no se considera este parámetro.

Calidad de aguas. Parámetro en el cual solamente se considera el oxígeno disuelto que no se tomará en cuenta para este estudio pero es indispensable reconocer las zonas muertas que se producen en el proceso de simulación.

Hidrología. No se considerará en el diseño del modelo numérico de la estructura debido a que en el presente trabajo de titulación no vinculamos el análisis del modelo numérico con caída de lluvia o inundaciones.

En el modelo numérico también se introducirán las condiciones de contorno refiriéndose específicamente a la entrada, salida y a las condiciones de flujo, en donde: la entrada con el parámetro de caudal total; entonces se seleccionará el régimen: crítico/subcrítico, luego el caudal total será acorde a la calibración de vertedero de entrada tomando un caudal constante de 1.875 l/s; en el tiempo inicial y a la salida del floculador se deberá asignar correctamente la entrada de flujo. Iber considera paredes infinitas en el modelo por lo que no es necesario dibujar las paredes del floculador, solamente se analizó la parte interna por donde circula el agua.

Para la salida del floculador se consideró un parámetro subcrítico también, aquí se deberá introducir los valores del tipo de vertedero, coeficiente del vertedero, altura de agua sobre el vertedero, y si son más de dos salidas se deberá registrar en este parámetro.

Rugosidad. Se tomará en cuenta el valor de rugosidad de Manning considerado para la estructura; como es de hormigón armado con enlucido de mortero, se tendrá el valor de Manning de 0.01, valor que deberá asignarse a toda la estructura salvo el caso de los vertederos de entrada y salida los cuales son de hierro fundido y en donde se tomará un valor de 0.013. (Participante, Marco, and Arias n.d.)

Mallado. La malla de cálculo es un elemento fundamental para conseguir buenos resultados. Iber dispone de multitud de maneras para obtener una buena malla de cálculo, y en función de las características del problema un tipo de malla será mejor que otro. Iber puede trabajar tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de

cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares, así como estructuradas o no estructuradas.

Las características de la malla se asignan con los siguientes menús:

El menú utilidades>preferencia>mallar, fija las opciones generales del mallado.

Con el Menú malla se fijan las propiedades de la malla asignadas a la geometría.(Flumen 2010)

Calcular. Para lanzar a la opción de cálculo se debieron fijar todos los valores correspondientes al modelo numérico antes mencionados.

El cálculo se lanza con el menú Calcular. A través de dicho menú es posible lanzar directamente el cálculo (“Calcular > Calcular”) o acceder a la ventana de cálculo (“Calcular > Ventana de cálculo”). Esta segunda opción permite tener un mejor control del proceso de cálculo, o acceder al archivo que muestra el estado del proceso (Botón Ver salida), mientras el cálculo se está ejecutando.

La ventana de información del proceso también se abre, durante el proceso o cuando éste ha finalizado, con el menú “Calcular > Ver información del proceso”. Es conveniente consultar dicha información para detectar avisos de posibles errores.

A continuación el Post Proceso. Una vez finalizado el cálculo, o durante el mismo, se puede acceder al post-proceso para visualizar y analizar los resultados. El cambio entre las interfaces de pre-proceso y post-proceso se realiza mediante el menú “Archivo > post-proceso” y “Archivo > pre-proceso”, o mediante los botones correspondientes de la barra de herramientas.

Iber dispone de multitud de opciones para visualizar y analizar los resultados, personalizar los colores, las leyendas, mostrar etiquetas de valores, etc. Una opción para visualizar resultados es mediante el menú “Ventana > ver resultados”. La ventana que se abre permite acceder a los distintos grupos de resultados (o Análisis) que se pueden visualizar en cada instante de tiempo, como áreas coloreadas, áreas coloreadas suavizadas, o vectores.

Los resultados a analizarse corresponden a periodos de simulación de 0 a 800 s, con intervalos de resultados de 20 segundos. Se puede apreciar en las imágenes 25-32 los resultados disgregados de cada operación.

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Resultados de ensayos de la Caracterización y Tratabilidad del agua.

Las tablas 5, 6, y 7 exhiben los resultados de los análisis realizados

Características del agua cruda.						
	04/06/2018	28/11/2018	28/01/2019	24/11/2020	8/12/2020	05/01/2021
Turbiedad NTU (FTU)	0.779	3.31	188	216	111	4.87
Color aparente U.C. (Pt-Co)	32	47	950	810	210	32
Color real U.C. (Pt-Co)	25	33	25	16	12	28
Conductividad uSiemens/cm	102.5	95.1	168.5	212.2	132.3	107.4
pH	7.60	7.60	6.90	7.28	7.58	7.51
Alcalinidad mg/l, $CaCO_3$	46.20	49.0	61.8	91.6	54.0	50.2
Fenolftaleína mg/l, $CaCO_3$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dureza total mg/l, $CaCO_3$	50.6	40.4	60.4	60	72.6	67.8
Calcio mg/l	15.8	15	19.8	19.84	18.64	16.4
Cloruros mg/l	3,5	4.9	8.2	14.2	4.7	4.9
Sulfatos mg/l	2.82	1.53	3.22	5.48	3.34	2.07
Hierro total mg/l	0.04	0.05	0.05	0.24	0.063	0.042
Manganeso mg/l	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1

Tabla 5. Tabla resumen características físico-químicas de agua cruda (Ensayos de Laboratorio)

# ENSAYO	FECHA	CONDICION CLIMATOLOGICA	DOSIS OPTIMA DE COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO	DOSIS OPTIMA DE POLIMERO
1	4 de Junio del 2018	Estiaje	20 mg/l	0.25 MG/L
2	28 de Noviembre del 2018	Estiaje	20 mg/l	0.5 mg/l
3	28 de Enero del 2019	Lluvioso	60 mg/l	0.375 mg/l
4	24 de Noviembre del 2020	Lluvioso	60 mg/l	0.375 mg/l
5	8 de Diciembre del 2020	Lluvioso	50 mg/l	0,375 mg/l
6	5 de Enero de 2021	Estiaje	20 mg/l	0.25 mg/l

Tabla 6. Dosis óptima de coagulante y polímero (Ensayos de Laboratorio)

Características del agua tratada en la planta piloto						
	04/06/2018	28/11/2018	28/01/2019	24/11/2020	8/12/2020	05/01/2021
Turbiedad NTU (FTU)	0.699	0.875	3.11	0.789	0.951	0.782
Color aparente U.C. (Pt-Co)	13	33	18	31	15	21
Color real U.C. (Pt-Co)	9.0	25	10	16	10	11
Conductividad uSiemens/cm	112.8	105.1	175.5	212.2	145.1	127.54
pH	7.09	7.09	6.70	6.78	6.58	6.55
Alcalinidad mg/l, $CaCO_3$	39.5	38.5	52.7	72.3	47.2	41.5
Fenolftaleína mg/l, $CaCO_3$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dureza total mg/l, $CaCO_3$	61.6	41.6	65.9	68	73.1	68.2
Calcio mg/l	19.2	17.2	20.3	20.04	19.03	15.23
Cloruros mg/l	3.9	5.0	8.5	14.8	4.5	4.5
Sulfatos mg/l	4.42	5.68	5.96	7.98	7.23	7.99
Hierro total mg/l	0.06	0.03	0.03	0.202	0.033	0.031
Manganeso mg/l	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1

Tabla 7. Características del agua tratada en la planta piloto.

4.2 Resultados de ensayos para determinación del caudal, por el Método Volumétrico.

En la planta piloto, en el vertedero de entrada se realizaron aforos mediante el método volumétrico, obteniendo los resultados de la **Tabla 8**.

H (cm)	t 1 (s)	Vol 1 (l)	t 2 (s)	Vol 2 (l)	t 3 (s)	Vol 3 (l)
5.65	33.88	12.39	35.2	12.75	36.61	13.20
6.55	25.27	13.17	26.23	13.47	25.86	13.38
7.20	19.4	12.2	19.9	13.44	20.81	13.21
8.55	14.49	13.14	14.76	13.44	14.5	13.23
9.36	11.28	12.52	11.55	12.91	11.31	12.64
9.79	10.06	12.23	10.01	12.05	10.45	12.47
9.98	9.47	12.14	9.48	12.47	9.73	12.58
10.39	8.61	12.14	9.55	13.23	8.56	12.14
10.99	7.78	12.41	7.78	12.58	6.93	11.64
11.68	6.48	12.17	6.61	12.23	6.47	12.11
12.29	5.76	12.23	5.75	12.23	5.36	11.55
13.54	3.54	9.323	4.12	11.47	4.45	11.88
14.04	3.86	11.11	3.53	10.41	3.6	10.94

Tabla 8. Datos de aforos sobre vertedero de entrada. Fuente Propia.

Con los datos de la Tabla 8 y mediante la ecuación 9, se obtienen las constantes para el cálculo del caudal teórico mostrados en la **Tabla 9**.

Constante para cálculo de caudal teórico	
Q teórico Cd=	0.616373

Tabla 9. Constantes para cálculo de caudal teórico.

Con la constante de la Tabla 9 se realiza el ajuste de los caudales, mostrados en el **Grafico 2**.

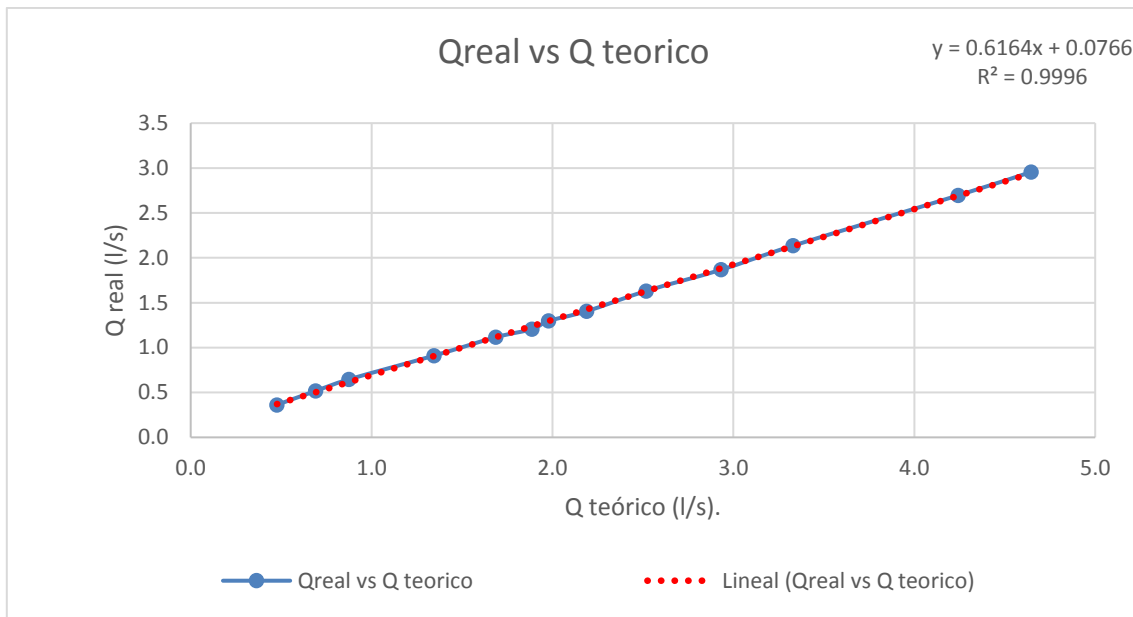


Grafico 2. Ajuste de caudales teórico y real para obtener formula de caudal de calibración.

Mediante la **ecuación 10**; con este dato es posible calibrar el caudal de entrada a la planta piloto que es de 1.875 l/s.

Se calcula también la altura de agua sobre el vertedero que es igual a 11.28 cm.

4.3 Ensayos de trazadores.

En la **Tabla 10** se muestra los resultados de ensayos en la planta piloto, mediante el uso de anilina y solución salina (NaCl), obteniendo un tiempo de retención promedio de 23 min., como se aprecia en el **Gráfico 3**.

ENSAYO DE TRAZADORES		
ENSAYO	TIEMPO (anilina)	TIEMPO (NaCl)
1	25.43	23,45
2	23.25	24
3	19.9	23.16
4	20	24.34
5	19.67	20.1
6	25.3	23.1
7	23.06	25.8
8	24.15	20.6
9	25.86	25.5
PROMEDIO	22.96	23.33

Tabla 10. Prueba de trazadores. Fuente Propia.

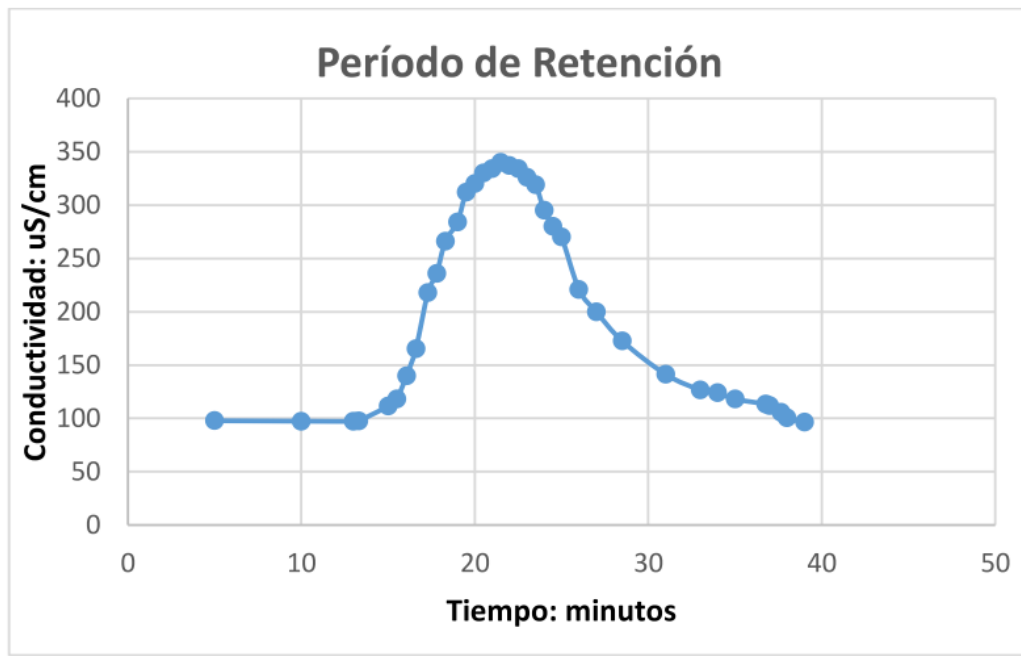


Grafico 3. *Calculo del periodo de retención en la estructura mediante el ensayo de trazadores.*

El período de retención real en la planta piloto es menor al diseñado (30 min); pues se obtiene un período de 23 min.; esto debido a que el cálculo inicial del piloto contempló la utilización de láminas de ferro cemento de 1 cm de espesor para la separación de las cámaras, pero la estructura obtenida era muy débil, por lo que se reemplazó por tabiques con estructura de hierro de 5cm con hierro, mallas y mortero (ver ANEXO); este cambio genera una disminución del volumen de agua que circula a través del piloto, incidiendo en el período de retención y en el gradiente hidráulico recalculado de 62 seg-1, gradiente a ser utilizado efectivamente en los ensayos de laboratorio para obtener parámetros de dosificación de coagulante y polímeros a emplearse en el análisis y mejoramiento de la calidad de agua.

4.4 Resultados de la verificación de modelo físico.

La **Tabla 11** Muestra los valores de volumen y gradientes para cada una de las unidades evaluadas en la Planta Piloto.

	VOLUMEN m^3	GRADIENTE DE VELOCIDAD s^{-1}
UNIDAD MEZCLA RAPIDA	0.005625	241.92
UNIDAD DE MEZCLA LENTA	2.5875	62.96

Tabla 11. Resultados de análisis de gradiente de velocidad en unidad de mezcla rápida y lenta respectivamente. Fuente (Propia).

4.5 Resultados de modelación numérica

Velocidad



Figura 9. Análisis de velocidad, paso 20 de 800 s, Fuente Propia

Comentario: El paso 0 de 800 es una imagen vacía por lo que se empezó del instante 20s.

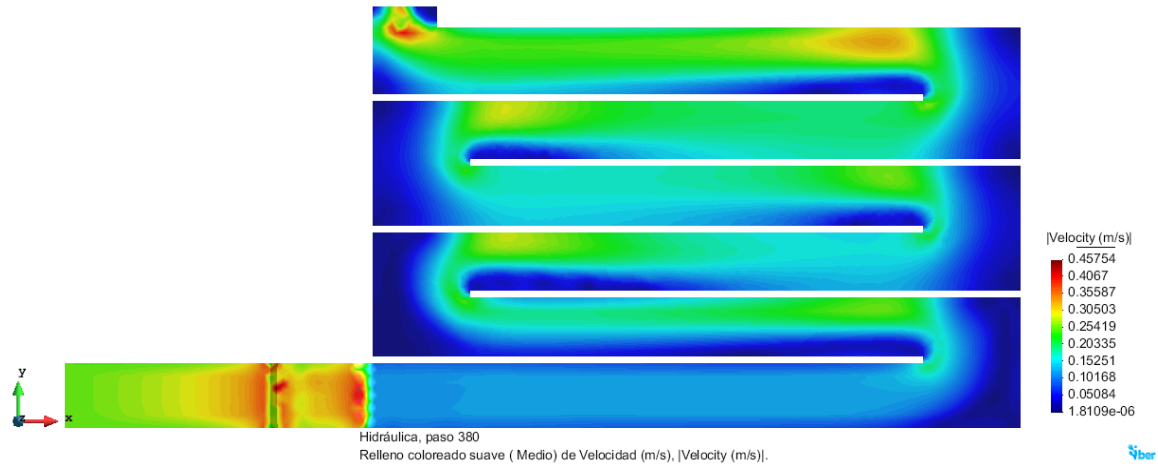


Figura 10. *Análisis de velocidad, paso 380 de 800 s, Fuente Propia*

Comentario: En el paso 380 a la mitad de la simulación los valores de velocidad empiezan a estabilizarse en el modelo numérico.

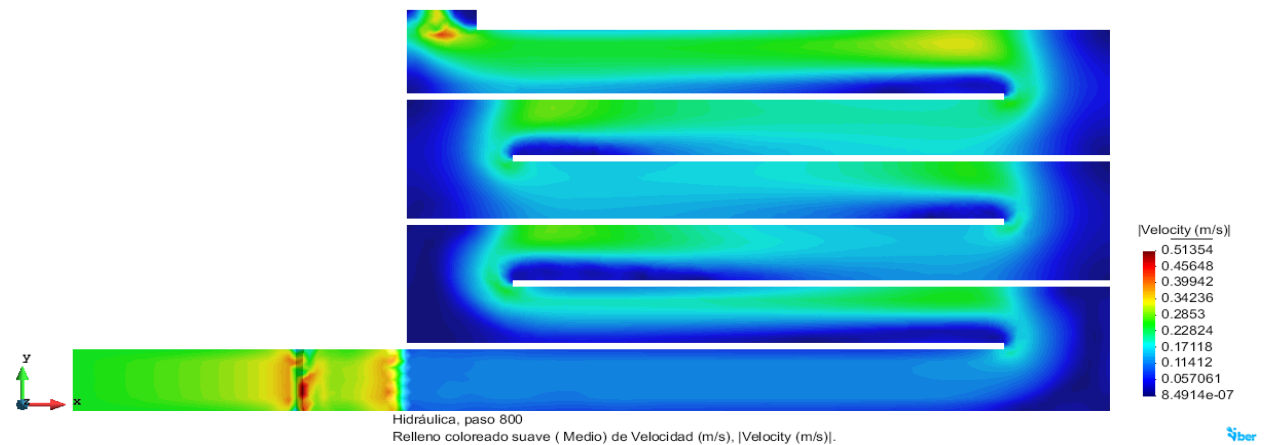


Figura 11. *Análisis de velocidad, paso 800 de 800 s, Fuente Propia*

Comentario: Fin de la simulación, paso 800 de 800 los valores de velocidad se encuentran completamente estabilizados el modelo numérico se encontraría de esta forma a lo largo del tiempo.

Froude

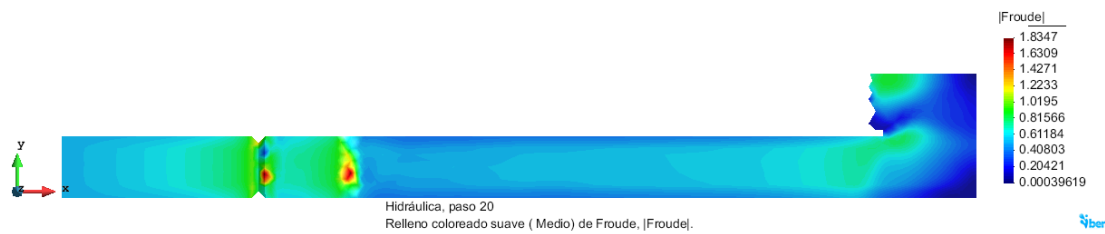


Figura 12. *Análisis de número de Froude, paso 20 de 800 s, Fuente Propia*

Comentario: El paso 0 de 800 es una imagen vacía por lo que se empezó del instante 20s

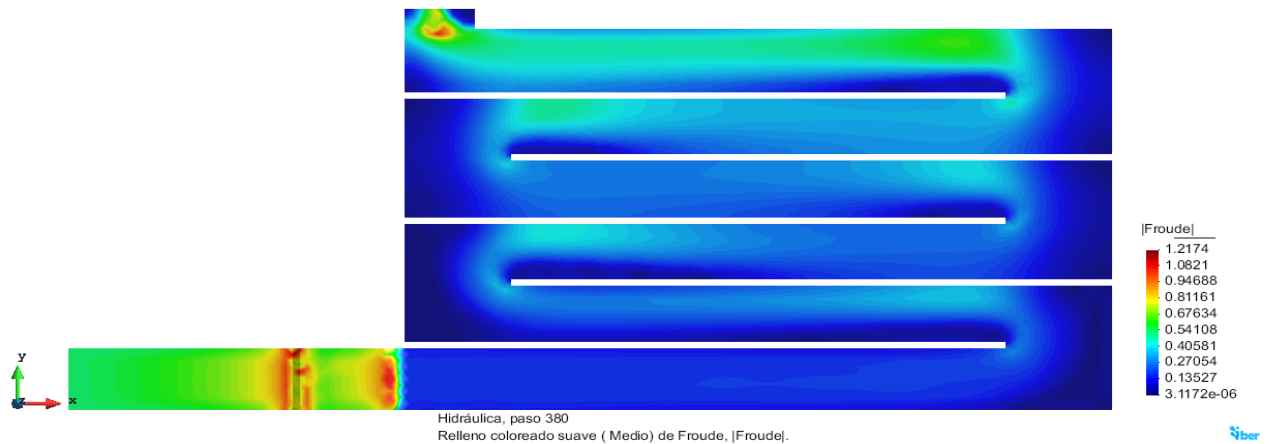


Figura 13. *Análisis de número de Froude, paso 380 de 800 s, Fuente Propia*

Comentario: En el paso 380 a la mitad de la simulación los valores de número de Froude empiezan a estabilizarse en el modelo numérico.

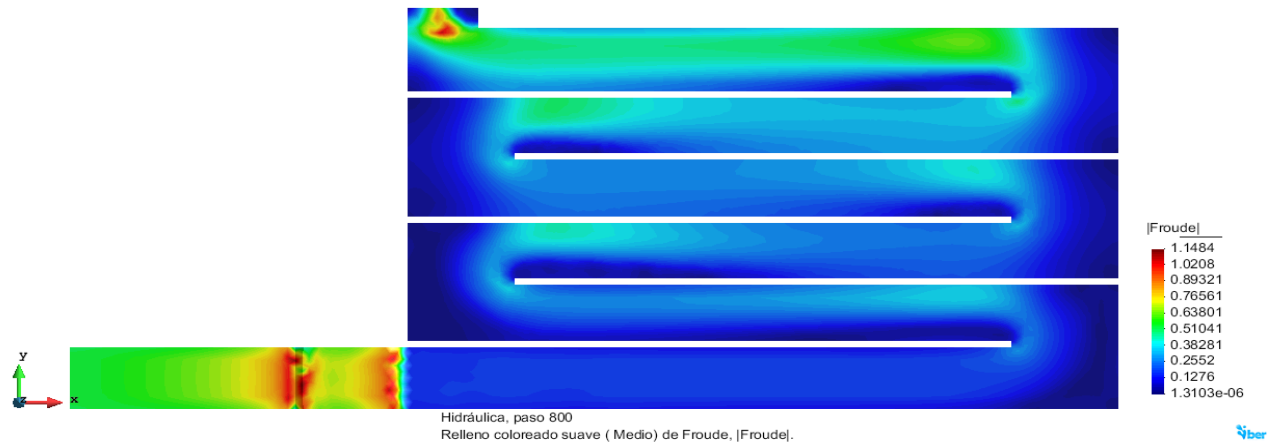


Figura 14. *Análisis de número de Froude, paso 800 de 800 s, Fuente Propia*

Comentario: Fin de la simulación, paso 800 de 800 los valores de numero de Froude se encuentran completamente estabilizados el modelo numérico se encontraría de esta forma a lo largo del tiempo.

Calado

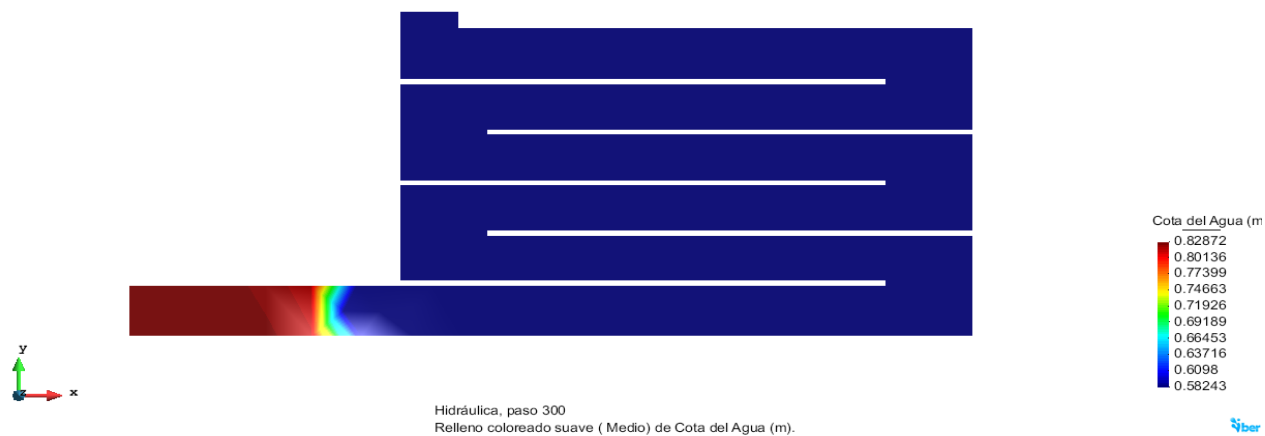


Figura 15. Análisis de cota de agua en el modelo, paso 800 de 800 s, Fuente Propia

Comentario: Fin de la simulación, paso 800 de 800 los valores de calado se encuentran completamente estabilizados el modelo numérico quedaría de esta forma.

Vectores de velocidad

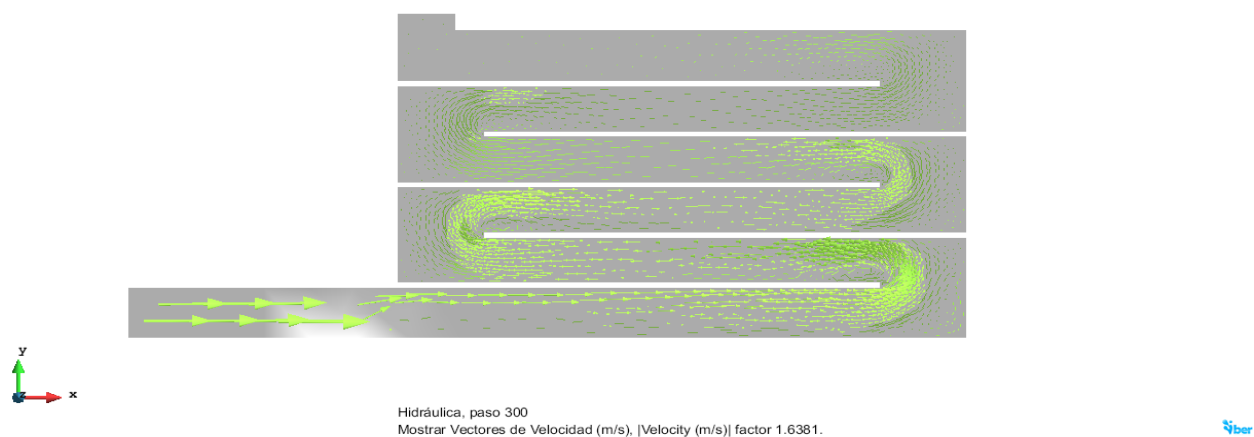


Figura 16. Análisis de vectores de velocidad, paso 800 de 800 s, Fuente Propia



Comentario: Fin de la simulación, paso 800 de 800 los vectores de velocidad se encuentran completamente estabilizados el modelo numérico se encontraría de esta forma a lo largo del tiempo, de acuerdo al tamaño de flechas se representa magnitud de velocidad, las zonas muertas se representan en la zona mayor coloreada de verde neón en las esquinas del floculador.

CAPITULO V. DISCUSION

5.1. Sobre la tratabilidad del agua

Características del agua cruda.

Al tratarse de una fuente superficial las características estéticas dependen del período hidrológico; se han tomado tres muestras en estiaje y tres en invierno.

Se observa que el color y la turbiedad son bajos en estiaje, en cambio en invierno debido al arrastre de sólidos que se produce en condiciones de escorrentía, los valores suben considerablemente, lo cual es debido a la naturaleza de la microcuenca, por lo que el tratamiento se dificulta en período de lluvias.

En cuanto a la calidad química, el río es una fuente de baja mineralización (conductividad), la cual se incrementa en lluvia por el ingreso a la solución de una mayor cantidad de solutos como cloruros, sulfatos, calcio, magnesio y otros.

Se mide la alcalinidad del agua para determinar su capacidad de amortiguamiento frente al coagulante al realizar el tratamiento, ya que éste actúa como ácido disminuyendo el pH de la muestra. Cuando la alcalinidad es baja, el agua tratada puede presentar un pH por debajo de lo establecido por la normativa (INEN 1108), pH entre 6-8. En general la fuente tiene baja capacidad de amortiguamiento, por lo que sería indeseable el uso de dosis altas de coagulante que se requieren cuando el agua presenta elevados niveles de color y turbiedad.

Se mide el cobre, hierro y manganeso, catalogados como elementos indeseables que también pueden generar color en el agua en este caso de origen mineral, considerando que el manganeso además tiene cierto carácter tóxico; los niveles detectados no son significativos, concluyendo que el color del agua es de origen vegetal y debido a la presencia de sustancias húmicas. **Tabla 5.**

Ensayos de tratabilidad.

De los ensayos de jarras realizados bajo las condiciones establecidas de tiempos y gradientes, se observa que en condiciones de estiaje las dosis óptimas de coagulantes y polímero son relativamente bajas: (20 mg/l de sulfato de aluminio y de 0,25 mg/l de polímero); en cambio en período de lluvias se necesitan dosis

mayores (50 a 60 mg/l de sulfato de aluminio y de 0,375 mg/l de polímero). **Tabla 6.**

Ensayos en la planta piloto

En la planta piloto se simula el proceso convencional de potabilización del agua en las siguientes etapas: coagulación (mezcla rápida), floculación (mezcla lenta) y sedimentación, utilizando las dosis óptimas de coagulante y polímero obtenidos previamente en los ensayos de laboratorio; una muestra del agua sedimentada posteriormente se lleva al laboratorio y se filtra en papel Whatman # 40 para simular la filtración y así se completa el proceso.

Al aplicar las sustancias químicas en las dosis y concentraciones establecidas a nivel de laboratorio, las características físicas del agua mejoran sustancialmente; la turbiedad en la mayoría de los casos es menor a 1 NTU, y el color en algunas veces alcanza el valor establecidos por la normativa. (20 UC). **Tabla 7.**

Estos datos indican que la experimentación en laboratorio aplicada luego a los pilotos reproducen resultados satisfactorios; porque aunque el proceso de floculación y coagulación sea aplicable a aguas superficiales con variaciones de color y turbiedad, es necesario encontrar las dosis de químicos que produzcan la mayor remoción de las partículas coloidales.

5.2 Sobre la validación del modelo físico

Para la validación del modelo físico, se midió la altura de agua sobre la base del modelo físico, de acuerdo a la figura 8 y la figura 15 la cual corresponde a la altura de agua sobre la base de la unidad de mezcla lenta para floculación y los resultados obtenidos del modelo numérico, con una variación de un 5%; la variación de valores de altura mencionados en estas figuras debido a la introducción de caudales en el modelo físico y en el numérico siendo que se tiene 1.875 l/s y 2 m/s respectivamente; además los resultados del modelo numérico identificaron zonas muertas y que se relacionaron con las observadas en la planta piloto; por lo tanto, no se garantiza las velocidades requeridas del flujo para que se obtenga el gradiente necesario para la floculación, teniendo en cuenta que según los gráficos 10, 11 y 12 la velocidad en las zonas muertas esta alrededor de 0.06-0.11 m/s que de acuerdo a Cepis. 1998, proporciona gradientes de 2-5 s⁻¹, con la cual prácticamente no hay floculación.

5.3 Sobre la modelación numérica (Iber)

La modelación numérica se realizó mediante el software Iber, en el cual se introdujeron parámetros de caudal de cota de agua; se observa que para desarrollar este proceso se requiere realizar un diseño exhaustivo de una figura 3D que represente la planta piloto construida en el parque el paraíso. El software Iber no



permite el ingreso de caudales menores a 2 l/s por lo que los resultados son semejantes a los presentados en el modelo físico, generalmente Iber se usa para dimensionamiento a gran escala, para el control de inundaciones en ríos, modelación en pilas de puentes de un río.

Iber es muy dinámico e intuitivo al momento de realizar los análisis.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

1. Los ensayos realizados a nivel de laboratorio (Jarr-test), determinaron los parámetros de dosificación a aplicarse en la planta piloto, los cuales son dependientes de la calidad del agua cruda: en estiaje de 20mg/l para el coagulante y de 0,25 mg/l de polímero; en cambio en período de lluvias se necesitan dosis mayores de 50 a 60 mg/l de sulfato de aluminio y de 0,375 mg/l de polímero.
2. En lo referente a la calidad del agua, los resultados obtenidos en la planta piloto demuestran que la experimentación previa a través de los ensayos de laboratorio permiten mayor eficiencia en los procesos de potabilización a escala real; por lo tanto se concluye en la necesidad de proceder con ensayos de simulación para el diseño definitivo de las plantas de agua potable con tratamiento convencional, primero a escala de laboratorio y de ser posible, a escala piloto.
3. Si se compara la calidad del agua obtenida en la planta piloto y en los ensayos de jarras a nivel de laboratorio, se observa que es mejor en la segunda, esto debido a que a pequeña escala el volumen de muestra utilizado es sólo dos litros; el mezclado durante la coagulación y la floculación son totalmente homogéneos; la temperatura del ensayo es estable, es decir todas las condiciones son controladas; en cambio en el piloto hay limitantes; existen zonas muertas en el floculador; se maneja un volumen de agua mucho mayor, la temperatura es variable, quizá el caudal también, por lo que la calidad del efluente es menor; no obstante la reproducibilidad de los datos es satisfactoria, porque el piloto también el piloto genera efluente de calidad.
4. Se concluye que el río Tomebamba en el punto de monitoreo, constituye una fuente de agua cruda, la cual puede ser tratada mediante sistema convencional; representa la condición más fácil para este tipo de tratamiento, ya que la presencia de turbiedad ayuda al actuar como núcleos en la formación de los flóculos, condición no existente cuando el agua tiene elevados niveles de color sin turbiedad; la calidad del efluente en la planta piloto presenta características compatible con varios usos incluido el consumo humano, después de un riguroso sistema de desinfección.
5. En el modelo numérico las alturas de agua de la figura 31 corresponden a las del modelo físico, esto se puede apreciar en el plano en la figura 4., lo que demuestra la correlación de los datos.
6. Las velocidades del flujo en el modelo físico y en el modelo numérico son comparables; comprobando la velocidad con la ecuación de continuidad



$Q=V.A$, la velocidad para el modelo físico es de 0.06m/s, tomando el área de 0.50 m de altura de la unidad de mezcla lenta y 0.30 m de ancho (base del vano), y de acuerdo a la figura 9 presentado como resultado en el modelo numérico, se observa que la velocidad se encuentra dentro del rango para que se desarrolle la correcta floculación. (Se estableció un rango de coloración entre celeste y azul correspondientes a los valores de 0.06 y 0.51 respectivamente)

6.2. Recomendaciones

- Puesto que la calidad del agua de fuentes superficiales depende de las condiciones climatológicas, se recomienda en los estudios de calidad caracterizar la fuente por lo menos durante un año, de tal manera que se conozca la variabilidad de parámetros físicos como el color y la turbiedad; y bacteriológicos como bacterias coliformes; estos son los aspectos que mayormente deben ser corregidos mediante cualquier sistema de tratamiento.
- Ser exhaustivo en el diseño y construcción de modelos físicos, de tal manera que garanticen su replicabilidad en el prototipo; en este caso se debe garantizar la reproducibilidad de factores como: período de retención, el gradiente hidráulico y la velocidad del flujo.
- Una nueva planta piloto, debe incorporar también la construcción de un sedimentador, ya que en el presente estudio se simuló esta etapa mediante el ingreso del agua a un tanque pero a diferente altura lo cual produce disturbio del flujo afectando al flóculo ya formado y por lo tanto disminuyendo la calidad del efluente final.



6.3. Futuras líneas de investigación

- Se podría comparar y evaluar la bondad de Iber, aplicando otro software en la construcción de plantas piloto con el mismo fin.
- Utilizar el modelo físico, con paredes cóncavas para garantizar la velocidad de floculación.

7. BIBLIOGRAFIA

- Pérez, M 2018, Ingeniería de Ríos, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Bladé, E Cea, L Corestein, G Escolano, E Puertas, J Vázquez-cendón, E Dolz, J Coll, A, 2014. "Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería". CIMNE.
- Brufau, Vázquez-Cendón, & García-Navarro, 2002. "Incorporación de los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento". Ediciones Limbo.
- ARBOLEDA VALENCIA, JORGE; "Teoría y práctica de la purificación del agua", McGraw-Hill Book Company, Inc., tercera edición, tomo 1: páginas 199-362, ISBN: 958-41-0012-2, 2000.
- Ordoñez Galo, Escuela D E Ingeniería, Daniel, Leonardo Idrovo, Calle "Optimización del proceso de floculación y coagulación de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de bayas.", Universidad de Cuenca, Abril 2015 (Fuente: Bolinaga, J. J. "Drenaje Urbano" INOS 1979),
- (Villegas, R. A. y R. D. Letterman. "Optimizing Flocculator Power Input", Journal of the Environmental Division, abril, 2016).
- Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del Agua: Evaluación y diagnóstico*. Medellín: EDICIONES DE LA U.
- 2D, IBER FLUJO. 2015. "Tema 7. TURBULENCIA." 1: 112.
- Cepis. 1998. "DISEÑO DE FLOCULADORES." *Manual III: Evaluación de plantas de Tecnología Apropia*da 2(Floculadores): 42. http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualII/ma2_cap3.pdf.
- Dad, C A L, and D E L Agua. 2000. "CALIDAD DEL AGUA." 1: 185.
- EMAC-CONV. DE COOPER.-MEJORAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA PARQUE EL PARAISO-UC-FAC. INGENIERIA-11-DICIEMBRE-2015.Pdf.
- Flumen, CEDEX. 2010. "Manual Básico de Usuario." *IBER MODELIZACION BIDIMENSIONAL DEL FLUJO EN LAMINA LIBRE EN AGUAS POCO PROFUNDAS* 3: 22.
- Garcia-Salas, Juan-C., and Bernard Chocat. 2009. "La Modelación En El Campo de La Ingeniería Hidráulica: Reflexiones y Discusión Sobre Las Causas de Error y Sus Consecuencias." *Aqua-LAC* 1(1): 52–62.
- Participante, Investigador, M E N C Marco, and Antonio Arias. "Instituto Politécnico Nacional." : 1–52.
- Sanitary, Engineering Laboratory, Laboratory of hydraulics & dynamics of Fluids, and department of civil engineering of the university of Cuenca Cuenca. 2017. "Memoria Técnica Proyecto: Mejoramiento de La Calidad de Agua Del Sistema Recreacional Del Parque El Paraiso."
- Seminario, Ricardo. 2012. "Metodos Numéricos Para Ingeniería." *Libro*: 69.



<http://disi.unal.edu.co/~lctorress/MetNum/LiMetNu2.pdf>.

8. ANEXOS



Figura A. Hierros colocados para el soporte de los vanos, en modelo físico. Fuente propia



Figura B. Vanos enlucidos de mortero, modelo físico. Fuente propia



Figura C. Ensayo de trazadores. Fuente propia



Figura D. Dosificación de coagulante y polímero. Fuente propia